



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC-DC *BUCK BOOST* DUA ARAH UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK

Yudo Kusuma Wijaya
NRP 2211 100 014

Dosen Pembimbing
Dr. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng.
Ir. Teguh Yuwono

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BIDIRECTIONAL
BUCK BOOST DC-DC CONVERTER FOR ELECTRIC
VEHICLE APPLICATION**

Yudo Kusuma Wijaya
NRP 2211 100 014

Advisor
Dr. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng.
Ir. Teguh Yuwono

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC-
DC BUCK BOOST DUA ARAH UNTUK APLIKASI
KENDARAAN LISTRIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**


**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2


Dr. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng.
NIP. 197311192000031001


Ir. Teguh Yuwono
NIP. 195008061976121002



Desain dan Implementasi Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah untuk Aplikasi Kendaraan Listrik

Yudo Kusuma Wijaya
2211100014

Pembimbing I : Dr. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng.
Pembimbing II : Ir.Teguh Yuwono

ABSTRAK

Konverter DC-DC merupakan peralatan penting pada kendaraan listrik. Konverter ini berfungsi untuk menurunkan (*buck*) atau menaikkan (*boost*) tegangan arus searah (DC). Pada aplikasi kendaraan listrik, konverter DC-DC diperlukan guna mengubah level tegangan dari baterai agar sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan motor begitu pula sebaliknya. Kendaraan listrik membutuhkan konverter yang dapat bekerja secara dua arah (*bidirectional*), sehingga dapat mengatur penyaluran daya dari baterai menuju motor pada saat akselerasi dan dari motor menuju baterai pada saat pengereman regeneratif. Pada mode akselerasi, konverter DC-DC dapat bekerja menaikkan ataupun menurunkan tegangan dari sisi tegangan baterai menuju sisi tegangan motor. Pada saat pengereman regeneratif, konverter DC-DC menurunkan dan menaikkan tegangan dari sisi motor menuju baterai agar sesuai dengan tegangan pengisian baterai. Pada pengerjaan tugas akhir ini, topologi konverter disimulasikan menggunakan software PSIM. Implementasi konverter DC-DC diuji menggunakan beban motor DC penguatan terpisah sehingga konverter dapat bekerja menaikkan dan menurunkan tegangan DC pada dua arah aliran daya.

Kata kunci : kendaraan listrik, konverter DC-DC, motor DC, pengereman regeneratif

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Design and Implementation of Bidirectional Buck Boost DC-DC Converter for Electric Vehicle Application

Yudo Kusuma Wijaya
2211100014

Advisor I : Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
Advisor II : Ir. Teguh Yuwono

ABSTRACT

DC-DC converter is important equipment for electric vehicle. This converter used to step-down (buck) or step-up (boost) a direct current (DC) voltage. For electric vehicle application, DC-DC converter needed to change voltage level from battery so as fit with motor voltage and vice versa. Electric vehicle required converter which able to work bidirectional, so it can flows power from battery to motor when accelerating and from motor to battery when regenerative braking. During acceleration, converter works by step-up or step-down DC voltage from battery to motor. When braking (regenerative), converter step-up or step-down motor's voltage to battery so as suitable for battery charging. In this final project, topology of this converter is simulated using PSIM software. Implementation of DC-DC converter is tested using DC motor separately exited so converter can work step-up or step-down in two direction of power flow.

Keywords : electric vehicle, DC-DC converter, DC motor, regenerative braking

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat serta hidayat-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan buku Tugas Akhir dengan judul “Desain dan Implementasi Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah untuk Implementasi Kendaraan Listrik” ini. Buku ini penulis dedikasikan kepada Ibu, Kakak, Adik-adik serta keluarga penulis yang dengan tulus menyayangi dan mendorong penulis hingga saat ini. Selain itu penulis persembahkan buku ini bagi kemajuan ilmu pengetahuan elektronika daya dalam perkembangan teknologi nasional.

Penulis mengharapkan dengan disusunnya buku Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kalangan akademisi, teknisi, industri, dan siapapun yang tertarik kepada bidang elektronika daya khususnya konverter DC-DC *buck boost* dua arah. Penulis sadar bahwa pada pengerjaan tugas akhir dan penyusunan buku ini tidaklah sempurna, maka dari itu penulis mengaharapkan tanggapan dan saran yang membangun dari semua pihak agar lebih baik pada masa mendatang.

Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang senantiasa memberi motivasi, doa dan banyak hal yang tak terhitung jumlahnya.
2. Bapak Dr. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng. sebagai pembimbing pertama yang telah meluangkan banyak waktu dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
3. Bapak Ir.Teguh Yuwono sebagai pembimbing kedua serta sebagai koordinator bidang studi teknik sistem tenaga yang telah memberikan banyak ilmu dan dukungan selama pembimbingan.
4. Segenap dosen pengajar dan karyawan jurusan Teknik Elektro ITS.
5. Teman-teman di Laboratorium Konversi Energi B101.
6. Teman-teman Teknik Elektro ITS Angkatan 2011.
7. Berbagai pihak yang telah membantu dalam penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga buku ini dapat memberi manfaat ilmu bagi penulis maupun pembaca.

Surabaya, Juli 2015

Yudo Kusuma Wijaya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
 BAB 2 KONVERTER DC-DC <i>BUCK BOOST</i> DUA ARAH	
2.1 Konverter DC-DC <i>Buck</i>	5
2.2 Konverter DC-DC <i>Boost</i>	6
2.3 Konverter DC-DC <i>Buck Boost</i> Dua Arah	8
2.3.1 Topologi Konverter DC-DC <i>Buck Boost</i> Dua Arah	9
2.3.2 Mode Operasi Konverter DC-DC <i>Buck</i> <i>Boost</i> Dua Arah	10
2.4 Pembangkit Sinyal Pensaklaran	13
2.5 Motor DC	14
 BAB 3 DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC-DC BUCK BOOST DUA ARAH	
3.1 Konfigurasi Sistem	17
3.1.1 Mode Akselerasi	18
3.1.2 Mode Pengereman Regeneratif	19
3.2 Penentuan Parameter Sistem	20
3.2.1 Perhitungan Nilai Induktor L	21
3.2.2 Perhitungan Nilai Kapasitor C1 dan C2	21

3.3	Simulasi Konverter	22
3.3.1	Simulasi Mode Akselerasi <i>Boost</i>	22
3.3.2	Simulasi Mode Pengereman <i>Buck</i>	25
3.4	Implementasi Desain Konverter DC-DC <i>Buck Boost</i> Dua Arah	27
3.4.1	Induktor L	28
3.4.2	Kapasitor C_1 dan C_2	29
3.4.3	Mosfet	29
3.4.4	Driver Mosfet	29
3.4.5	Pembangkitan Sinyal PWM dengan Mikrokontroler ATmega16	30
3.4.6	Sensor Tegangan	31
3.4.7	Sensor Arus	32
3.4.8	Sensor Kecepatan	32
3.4.9	Baterai	33
3.4.10	Motor DC dan Beban <i>Flywheel</i>	34

BAB 4 HASIL IMPLEMENTASI DAN ANALISIS DATA

4.1	Pengujian Konverter DC-DC <i>Buck Boost</i> Dua Arah	37
4.2	Performa Konverter DC-DC Mode <i>Buck</i> dan <i>Boost</i>	39
4.2.1	Mode Akselerasi <i>Boost</i>	40
4.2.2	Mode Pengereman <i>Buck</i>	43
4.3	Analisis Performa Sistem pada Mode Akselerasi dan Pengereman Regeneratif	46
4.3.1	Tegangan Terminal Motor DC	47
4.3.2	Arus Jangkar Motor DC	49
4.3.3	Kecepatan Motor DC	50
4.3.4	Arus Baterai	52
4.3.5	Tegangan, Arus dan Daya pada Sisi Baterai	54

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57

DAFTAR PUSTAKA	59
-----------------------------	----

LAMPIRAN	61
-----------------------	----

RIWAYAT HIDUP PENULIS	67
------------------------------------	----

DAFTAR TABEL

Daftar Tabel	Halaman
Tabel 3.1	Parameter desain rangkaian konvrter DC-DC <i>buck boost</i> dua arah 21
Tabel 3.2	Parameter simulasi konverter mode akselerasi <i>boost</i> . 23
Tabel 3.3	Parameter simulasi konverter mode akselerasi <i>boost</i> . 26
Tabel 3.4	Parameter inti besi pada induktor toroida. 28
Tabel 3.5	Rating Motor DC 34
Tabel 4.1	Hasil pengujian motor pada penentuan nilai $k.\phi$ motor DC 38
Tabel 4.2	Parameter pengujian konverter. 39

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Daftar Gambar	Halaman
Gambar 2.1 (a) Konverter DC-DC tipe <i>buck</i>	5
(b) Rangkaian pengganti saat saklar tertutup	5
(c) Rangkaian pengganti saat saklar terbuka	5
Gambar 2.2 (a) Konverter DC-DC tipe <i>boost</i>	7
(b) Rangkaian pengganti saat saklar tertutup	7
(c) Rangkaian pengganti saat saklar terbuka	7
Gambar 2.3 Topologi konverter DC-DC <i>buck boost</i> dua arah	9
Gambar 2.4 Rangkaian pengganti konverter mode akselerasi <i>buck</i>	10
Gambar 2.5 Rangkaian pengganti konverter mode akselerasi <i>boost</i>	11
Gambar 2.6 Rangkaian pengganti konverter mode pengereman <i>buck</i>	12
Gambar 2.7 Rangkaian pengganti konverter mode pengereman <i>boost</i>	13
Gambar 2.8 Pembangkit sinyal pensaklaran.....	13
Gambar 2.9 Bentuk gelombang keluaran PWM.....	14
Gambar 2.10 Motor DC eksitasi terpisah	15
Gambar 3.1 Konfigurasi sistem konverter DC-DC <i>buck</i> <i>boost</i> dua arah.....	17
Gambar 3.2 Diagram kontrol mode akselerasi	18
Gambar 3.3 Diagram kontrol mode pengereman regeneratif	19
Gambar 3.4 Pensaklaran pada mode akselerasi <i>boost</i>	23
Gambar 3.5 Tegangan dan arus induktor pada mode akselerasi <i>boost</i>	24
Gambar 3.6 Riak tegangan V_2 pada mode akselerasi <i>boost</i>	25
Gambar 3.7 Tegangan dan arus induktor pada mode pengereman <i>buck</i>	26
Gambar 3.8 Riak tegangan V_1 pada mode pengereman <i>buck</i>	27
Gambar 3.9 Rangkaian konverter DC-DC <i>buck boost</i> dua arah.....	27
Gambar 3.10 Mosfet IRF540N.....	29
Gambar 3.11 Konfigurasi pin pada photocoupler tlp250	30
Gambar 3.12 Prinsip kerja <i>timer/counter</i> mikrokontroler AVR sebagai pembangkit sinyal PWM	31
Gambar 3.13 Resistor pembagi tegangan pada sensor tegangan	32
Gambar 3.14 Tachogenerator	33

Gambar 3.15	Dua buah baterai aki per 12V.....	33
Gambar 3.16	Motor DC beserta beban flywheel	34
Gambar 4.1	Diagram sistem konverter beserta sumber tegangan baterai dan beban motor DC.....	37
Gambar 4.2	Penyalan keempat saklar pada mode akselerasi <i>boost</i>	40
Gambar 4.3	Tegangan dan riak arus induktor pada mode akselerasi <i>boost</i>	41
Gambar 4.4	Riak tegangan V_2 konverter pada mode akselerasi <i>boost</i>	42
Gambar 4.5	Perbandingan grafik tegangan V_1 dan V_2 konverter pada mode akselerasi <i>boost</i>	43
Gambar 4.6	Tegangan dan arus induktor L pada mode pengereman <i>buck</i>	44
Gambar 4.7	Riak tegangan V_2 konverter pada mode pengereman <i>buck</i>	45
Gambar 4.8	Grafik tegangan V_1 dan V_2 konverter pada mode pengereman <i>buck</i>	45
Gambar 4.9	Grafik tegangan terminal motor, arus jangkar, dan Kecepatan motor DC.....	46
Gambar 4.10	Tegangan terminal motor DC (b) dengan pengereman regeneratif.....	47
	(c) tanpa pengereman regeneratif.....	47
Gambar 4.11	Arus jangkar motor DC (b) dengan pengereman regeneratif.....	49
	(c) tanpa pengereman regeneratif.....	49
Gambar 4.12	Grafik kecepatan motor DC (b) dengan pengereman regeneratif.....	51
	(c) tanpa pengereman regeneratif.....	51
Gambar 4.13	Grafik arus baterai (b) dengan pengereman regeneratif.....	53
	(c) tanpa pengereman regeneratif.....	53
Gambar 4.14	Hubungan tegangan dan arus baterai.....	55

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan bahan bakar fosil yang kian menipis menyebabkan terjadinya kelangkaan serta kenaikan harga bahan bakar minyak (BBM) [2]. Masyarakat khususnya di Indonesia dalam kehidupan sehari-hari sangat bergantung pada BBM, contohnya pada sarana transportasi. Sehingga dengan terjadinya kelangkaan BBM telah mendorong krisis energi dan dapat mengganggu berbagai sektor khususnya transportasi. Selain itu penggunaan BBM secara terus menerus dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang berdampak pada perubahan iklim dunia. Para ilmuwan mulai mencari solusi energi alternatif yang dapat digunakan untuk menggantikan energi konvensional dan berbagai energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan telah mulai digunakan.

Dalam rangka mengatasi kelangkaan bahan bakar minyak dan pencemaran lingkungan, industri otomotif mengembangkan kendaraan listrik. Kendaraan listrik merupakan solusi ideal guna mengatasi kelangkaan energi [2][6]. Tidak seperti kendaraan konvensional, kendaraan listrik menggunakan energi listrik sebagai energi utama. Kendaraan listrik sangat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan gas buang seperti pada kendaraan konvensional. Kendaraan listrik memerlukan media penyimpanan energi berupa baterai dan memerlukan motor listrik sebagai penggerak [6]. Namun demikian, biaya investasi awal yang mahal, jarak berkendara yang relatif pendek dan lamanya waktu pengisian baterai menjadi kekurangan dari kendaraan listrik ini.

Konverter DC-DC merupakan bagian yang sangat penting pada kendaraan listrik. Seperti yang sudah diketahui bahwa kendaraan listrik membutuhkan baterai sebagai media penyimpanan energi. Konverter DC-DC diperlukan guna mengubah level tegangan dari baterai agar dapat digunakan untuk mensuplai daya motor [6]. Konverter pada kendaraan listrik diharapkan dapat bekerja menurunkan maupun menaikkan level tegangan. Sehingga diperlukan konverter DC *buck-boost* guna memenuhi kebutuhan tersebut.

Pada kendaraan listrik dibutuhkan konverter yang dapat bekerja secara dua arah (*bidirectional*). Aliran daya mengalir dari baterai menuju motor listrik pada saat motor akan dipercepat. Pada saat motor hendak diperlambat, motor masih memiliki energi kinetik yang cukup

besar. Pada kendaraan konvensional, untuk mengurangi energi kinetik motor digunakan pengereman secara mekanik yaitu menggunakan tromol maupun cakram. Pengereman secara mekanis menyebabkan panas sehingga menimbulkan kemungkinan kerusakan pada komponen rem. Namun pada kendaraan listrik pengereman dapat dilakukan secara regeneratif yaitu dengan cara mengubah fungsi motor listrik menjadi generator, sehingga aliran daya akan berubah dari motor menuju baterai. Dengan dilakukannya pengereman regeneratif ini dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem [6].

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Desain dan implementasi konverter DC-DC *buck boost* dua arah.
2. Mode operasi konverter beserta bentuk sinyal tegangan dan arus keluaran pada dua arah aliran daya.
3. Pengaruh pengereman regeneratif terhadap parameter yang ada pada motor DC.

1.3 Tujuan

Tujuan pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Memahami cara kerja konverter DC-DC *buck boost* dua arah.
2. Membuat prototipe Konverter DC-DC *buck boost* dua arah.
3. Memahami pengaruh akibat pengereman regeneratif terhadap kerja konverter maupun pada motor DC.

1.4 Batasan Masalah

Lingkup pengerjaan tugas akhir ini dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Komponen-komponen yang digunakan pada implementasi alat diasumsikan merupakan komponen-komponen ideal.
2. Pengujian konverter keadaan *steady state* dilakukan pada daya sesuai desain, yaitu pada mode akselerasi *boost* dan pengereman *buck*.
3. Pengujian konverter keadaan dinamis dilakukan menggunakan sumber tegangan berupa baterai (AKI) dan beban berupa motor DC.
4. Implementasi konverter menggunakan sistem loop tertutup dengan umpan balik berupa tegangan output dan arus input konverter.

5. Arus pengisian baterai pada pengereman regeneratif diatur sebesar 500mA.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

a. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk pembelajaran *software* yang akan digunakan pada simulasi. Studi dan pembelajaran mengenai cara kerja dan topologi konverter DC-DC *buck boost* yang dapat bekerja secara dua arah sangat diperlukan guna pengerjaan tugas akhir ini.

b. Pengerjaan simulasi

Pengerjaan simulasi dilakukan menggunakan *software* PSIM. Nilai parameter yang digunakan pada simulasi diberikan berdasarkan hasil perhitungan dan digunakan sebagai acuan pada pemilihan komponen dan penentuan parameter pengujian pada implementasi.

c. Pembuatan rangkaian konverter

Pembuatan rangkaian konverter DC-DC *buck boost* dua arah dilakukan berdasarkan hasil dari simulasi. Sehingga diharapkan konverter dapat bekerja sesuai dengan hasil simulasi, yaitu dapat bekerja secara *buck* maupun *boost* pada dua arah aliran daya.

d. Analisa hasil rangkaian dengan hasil simulasi

Pada tahap ini, hasil kerja konverter dianalisis berdasarkan teori dan dibandingkan dengan hasil simulasi. Sehingga jika hasil dari keduanya sudah sesuai maka tercapai target tugas akhir ini.

e. Penyusunan buku Tugas Akhir.

Penyusunan buku tugas akhir ini berupa laporan ilmiah yang mencakup semua proses pengerjaan tugas akhir, mulai dari dasar teori yang dipelajari, topologi konverter yang digunakan, penentuan nilai komponen yang digunakan pada implementasi, hasil pembuatan alat beserta analisis kerja konverter hingga kesimpulan dan saran yang didapat berdasarkan pengerjaan tugas akhir ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan buku tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- **BAB 1 Pendahuluan**

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika, dan relevansi dari penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini.

- **BAB 2 Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah**

Bab ini berisi tentang dasar teori mengenai konverter DC-DC *buck boost* dua arah dan motor DC yang mendukung pengerjaan tugas akhir ini.

- **BAB 3 Desain dan implementasi Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah**

Bab ini berisi tentang proses perancangan sistem secara keseluruhan baik itu simulasi maupun penentuan parameter dan pemilihan komponen yang digunakan dalam pembuatan konverter DC-DC *buck boost* dua arah.

- **BAB 4 Hasil Implementasi dan Analisis Data**

Bab ini berisi analisis hasil kerja konverter. Data hasil pengujian alat dianalisis berdasarkan teori yang ada dan dibandingkan terhadap hasil simulasi.

- **BAB 5 Penutup**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran yang didapat dari pengerjaan tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Pengerjaan tugas akhir dan penyusunan buku tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

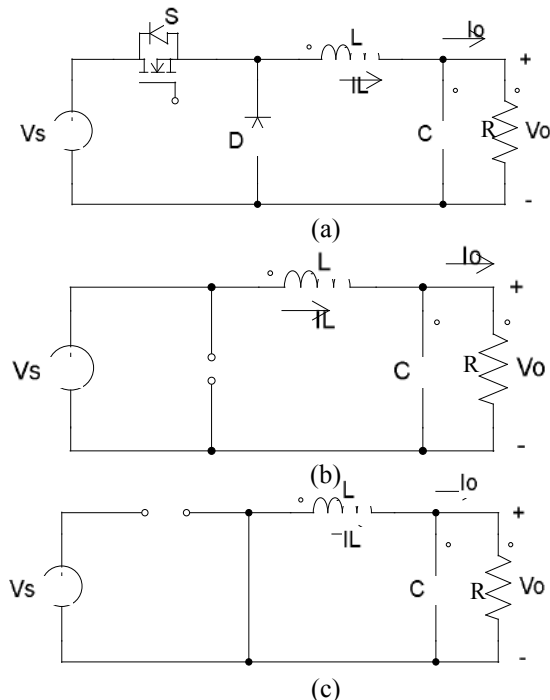
1. Memberikan kontribusi untuk kemajuan teknologi kendaraan listrik khususnya di Indonesia.
2. Sebagai bahan referensi mengenai konverter DC-DC *buck boost* dua arah.
3. Sebagai bahan pembelajaran elektronika daya bagi pembaca.

BAB 2

KONVERTER DC-DC *BUCK BOOST* DUA ARAH DAN MOTOR DC

2.1 Konverter DC-DC *Buck*

Konverter DC-DC *buck* dikenal sebagai konverter DC yang mampu menghasilkan tegangan output rata-rata V_o yang lebih rendah dibanding tegangan rata-rata input V_s [1]. Prinsip kerja konverter *buck* adalah memanfaatkan induktor sbagai penyimpan energi. Tegangan keluaran konverter *buck* memiliki polaritas yang sama dengan tegangan masukan. Topologi konverter *buck* beserta rangkaian pengganti rangkaian saat saklar terbuka dan tertutup ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. (a) Konverter DC-DC tipe *buck*, (b) Rangkaian pengganti pada saat saklar tertutup, (c) Rangkaian pengganti pada saat saklar terbuka.

Analisis saat saklar tertutup

Pada saat saklar dalam kondisi tertutup (ON) dioda dalam keadaan *reverse-bias*, sehingga tidak terdapat arus yang melewati dioda [7]. Pada kondisi ini arus akan mengalir dari sumber melalui induktor L dan beban R[1]. Pada keadaan ini induktor mengalami *charging* (pengisian) dengan persamaan sebagai berikut.

$$V_L = V_{in} - V_{out} = L \frac{dI_L}{dt_{on}} \quad (2.1)$$

Sehingga

$$L \times dI_L = (V_{in} - V_{out})dt_{on} \quad (2.2)$$

Analisis saat saklar terbuka

Pada saat saklar dalam kondisi terbuka (off) dioda dalam keadaan *forward-bias*, sehingga dioda melewatkan arus pengosongan induktor [7]. Pada kondisi ini arus mengalir dari induktor, ke beban, dilanjutkan ke dioda D dan kembali ke induktor [1]. Pada keadaan ini tegangan keluaran bernilai sama dengan tegangan induktor dengan persamaan.

$$V_L = -V_{out} = L \frac{dI_L}{dt_{off}} \quad (2.3)$$

Besarnya dI_L pada kondisi ini bernilai negatif dikarenakan arus pengosongan induktor bernilai turun, sehingga.

$$V_{out} = L \frac{dI_L}{dt_{off}} \quad (2.4)$$

Substitusi persamaan (2.2) ke persamaan (2.4) sehingga didapatkan:

$$V_{out} = \frac{(V_{in} - V_{out})dt_{on}}{dt_{off}} \quad (2.5)$$

Dengan

$$D = \frac{dt_{on}}{dt_{on} + dt_{off}} \quad (2.6)$$

Maka didapatkan.

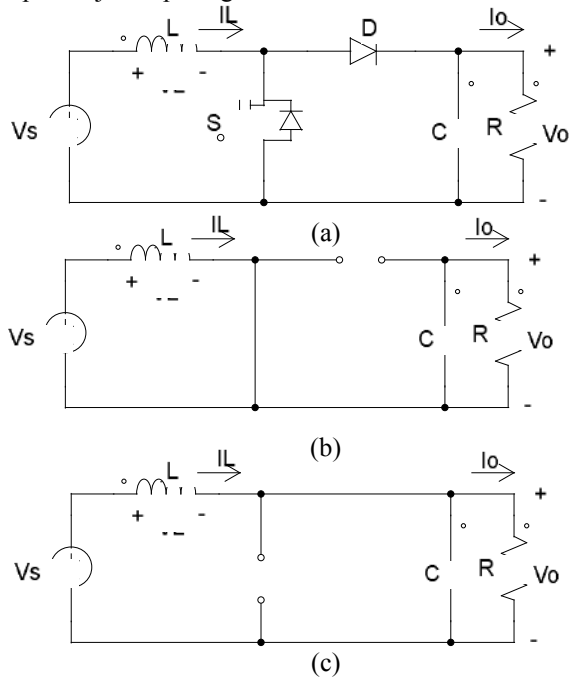
$$V_{out} = V_{in} \times D \quad (2.7)$$

Berdasarkan rumus tegangan keluaran *buck converter* diatas tegangan keluaran bernilai sama atau kurang dari tegangan masukan.

2.2 Konverter DC-DC Boost

Konverter *boost* mampu menghasilkan tegangan output yang lebih tinggi dibanding tegangan sumber atau inputnya [1]. Sama halnya dengan konverter *buck*, konverter *boost* memanfaatkan induktor sebagai penyimpan energi. Tegangan keluaran konverter *boost* memiliki polaritas yang sama dengan tegangan masukan.

Topologi konverter *boost* terdiri dari tegangan DC masukan V_s , induktor L , saklar S , dioda D dan filter kapasitor C . Pensaklaran (*switching*) pada saklar S menggunakan *pulse width modulation* (PWM) dapat diatur untuk mendapatkan *duty cycle* yang diinginkan. Topologi konverter *boost* beserta rangkaian pengganti pada saat saklar terbuka dan tertutup ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. (a) Konverter DC-DC tipe *boost*; (b) Rangkaian pengganti pada saat saklar tertutup; (c) Rangkaian pengganti pada saat saklar terbuka.

Analisis saat saklar tertutup

Pada saat saklar dalam kondisi tertutup (on) dioda dalam keadaan *reverse-bias* sehingga tidak ada arus yang melewati dioda [7]. Pada kondisi ini semua arus mengalir ke negatif melalui saklar, maka arus yang mengalir ke beban R dapat diabaikan[1]. Pada kondisi ini induktor mengalami *charging* (pengisian) dengan persamaan:

$$V_L = V_{in} = L \frac{dI_L}{dt_{on}} \quad (2.8)$$

Sehingga

$$L \times dI_L = V_{in} \times dt_{on} \quad (2.9)$$

Analisis saat saklar terbuka

Pada saat saklar dalam kondisi terbuka (off) dioda dalam keadaan forward-bias sehingga dioda dapat mengalirkan arus [7]. Pada kondisi ini induktor berfungsi sebagai sumber arus atau sumber tegangan, sedangkan resistor berfungsi sebagai beban[1]. Pada kondisi ini induktor mengalami discharging (pengkosongan) dengan persamaan:

$$V_L = V_{out} - V_{in} = -L \frac{dI_L}{dt_{off}} \quad (2.10)$$

Pada kondisi ini dI_L bernilai negatif dikarenakan arus pengkosongan induktor bernilai turun, sehingga.

$$V_{out} = V_{in} + L \frac{dI_L}{dt_{off}} \quad (2.11)$$

Substitusi persamaan (2.9) ke persamaan (2.11) sehingga didapatkan:

$$V_{out} = V_{in} + \frac{V_{in} \times dt_{on}}{dt_{off}} \quad (2.12)$$

Dengan

$$D = \frac{dt_{on}}{dt_{on} + dt_{off}} \quad (2.13)$$

Maka didapatkan.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (2.14)$$

Berdasarkan rumus diatas, tegangan keluaran dapat diatur agar bernilai sama atau lebih besar dari tegangan masukan dengan cara mengatur *duty cycle* (D) pensaklaran.

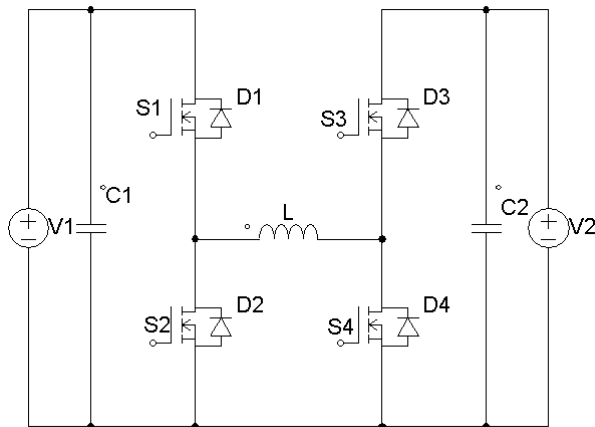
2.3 Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah

Konverter DC-DC dua arah umum digunakan untuk mengatur aliran daya dari suatu level tegangan DC menuju level tegangan DC yang lain seperti yang sering digunakan pada kendaraan listrik [5]. Pada kendaraan listrik, Konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini dapat berfungsi mengatur aliran daya pada saat akselerasi maupun pengereman (*braking*). Pada saat mode akselerasi, konverter mengalirkan daya dari baterai menuju ke motor. Tegangan pada motor dapat diubah-ubah dengan cara mengubah pola pensaklaran dan *duty cycle* pada konverter. Pada mode pengereman konverter mengalirkan

daya dari motor menuju baterai, pada keadaan ini kecepatan motor dapat diperlambat dan arus pengereman dapat digunakan untuk pengisian (*charging*) baterai. Arus pada mode pengereman dapat diatur sehingga mencegah kerusakan baterai saat tegangan baterai turun, pada keadaan ini tegangan pengisian baterai harus lebih kecil dari tegangan maksimum pengisian baterai sehingga arus pengisian tidak terlalu besar.

2.3.1 Topologi Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah

Topologi konverter DC-DC *buck boost* dua arah terdiri dari empat saklar, empat dioda, dua kapasitor dan satu induktor sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Topologi konverter DC-DC *buck boost* dua arah

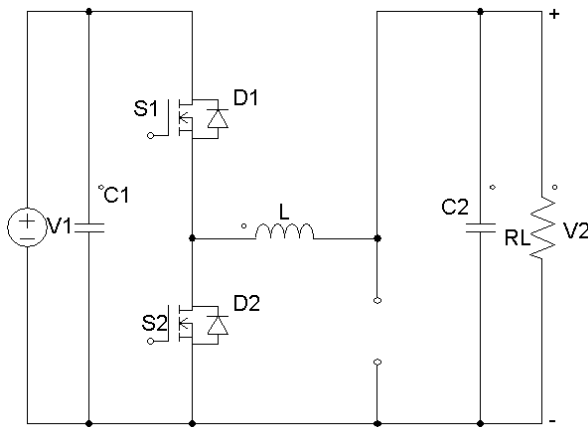
Konfigurasi rangkaian sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.3 adalah dua saklar yang disusun secara seri pada sisi tegangan V_1 dan dua saklar yang disusun secara seri pada sisi tegangan V_2 . Terpasang empat dioda yang masing-masing terpasang secara paralel dengan keempat saklar. Titik diantara kedua saklar pada sisi tegangan V_1 dan titik diantara kedua saklar pada sisi tegangan V_2 tersebut dihubungkan dengan sebuah induktor. Sisi negatif dari kedua tegangan V_1 dan V_2 saling dihubungkan. Kapasitor C_1 berfungsi memperhalus riak tegangan pada sisi V_1 , sedangkan kapasitor C_2 berfungsi memperhalus riak tegangan pada sisi V_2 .

2.3.2 Mode Operasi Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah

Konverter DC-DC *buck boost* dapat bekerja menurunkan (*buck*) dan menaikkan (*boost*) tegangan pada mode akselerasi dan pengereman regeneratif, dengan demikian terdapat empat mode operasi pada konverter ini.

Mode akselerasi *buck*

Pada mode akselerasi buck konverter berfungsi menurunkan level tegangan DC V_1 menjadi menjadi level tegangan DC V_2 yg bernilai lebih rendah . Pola pensaklaran yang digunakan adalah saklar S_1 berfungsi sebagai pencacah sehingga saklar S_1 bekerja secara ON/OFF [3]. Saklar S_2 dapat difungsikan sebagai kebalikan dari S_1 atau dapat diatur untuk selalu padam (OFF) karena terdapat dioda D_2 yang mengairkan arus saat S_1 padam. Saklar S_3 selalu hidup dan saklar S_4 selalu padam. Rangkaian pengganti pada mode akselerasi *buck* ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Rangkaian pengganti konverter mode akselerasi *buck*.

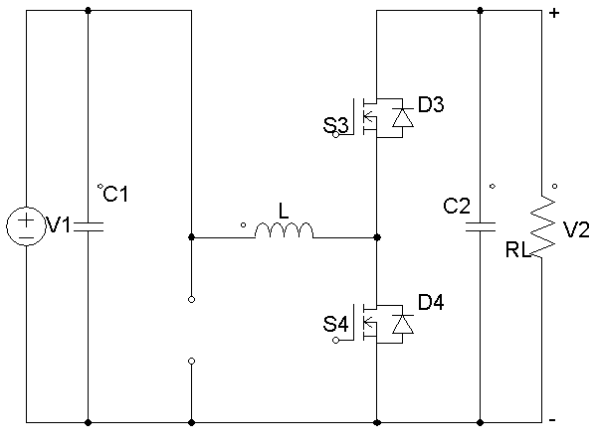
Dengan demikian konverter akan bekerja menurunkan tegangan ke arah kanan dengan persamaan tegangan:

$$V_2 = V_1 \times D_{S1} \quad (2.15)$$

dengan D_{S1} merupakan *duty cycle* saklar S_1

Mode akselerasi *boost*

Pada mode akselerasi *boost* konverter berfungsi menaikkan level tegangan DC V_1 menjadi menjadi level tegangan DC V_2 yg bernilai lebih tinggi . Pola pensaklaran yang digunakan adalah saklar S_1 selalu menyala dan saklar S_2 selalu padam. Saklar S_4 difungsikan sebagai pencacah sedangkan saklar S_3 dapat difungsikan sebagai kebalikan dari saklar S_4 atau dapat difungsikan selalu padam karena terdapat dioda D_3 yang akan mengalirkan arus pada saat saklar S_4 padam [3]. Rangkaian pengganti konverter pada mode akselerasi *boost* ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Rangkaian pengganti konverter mode akselerasi *boost*.

Dengan demikian konverter akan bekerja menaikkan tegangan ke arah kanan dengan persamaan tegangan:

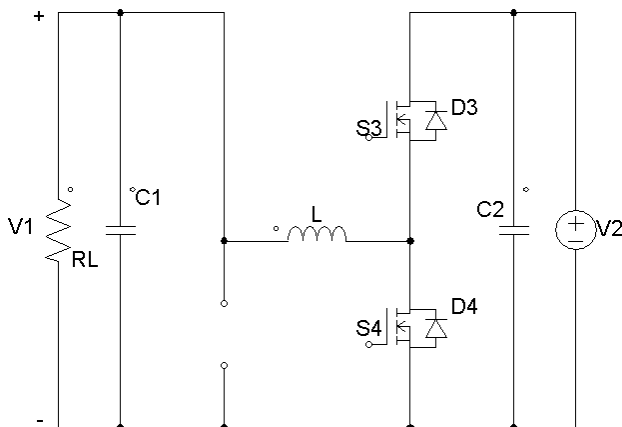
$$V_2 = \frac{V_1}{1-D_{S4}} \quad (2.16)$$

dengan D_{S4} merupakan *duty cycle* saklar S_4 .

Mode pengereman *buck*

Pada saat motor sedang berputar pada kecepatan tertentu maka akan timbul *back-emf* (emf balik) pada motor. Pada saat emf balik bernilai lebih besar daripada tegangan baterai maka konverter bekerja menurunkan (*buck*) dari V_2 (sisi motor) menuju V_1 (sisi baterai). Pada kondisi ini pola pensaklaran yang digunakan adalah saklar S_1 selalu

hidup dan saklar S_2 selalu padam. Saklar S_3 difungsikan sebagai pencacah sehingga saklar S_3 bekerja secara ON/OFF. Saklar S_4 dapat difungsikan sebagai kebalikan dari saklar S_3 atau dapat difungsikan selalu padam karena terdapat dioda D_4 yang berfungsi mengalirkan arus pada saat saklar S_3 padam.



Gambar 2.6. Rangkaian pengganti konverter mode pengereman *buck*.

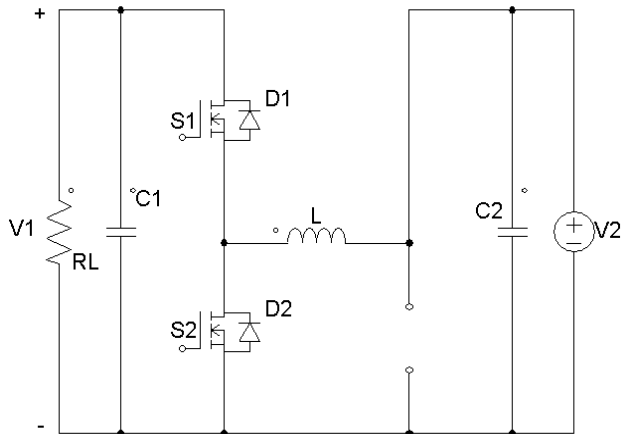
Dengan demikian konverter akan bekerja menurunkan tegangan ke arah kiri dengan persamaan tegangan:

$$V_1 = V_2 \times D_{S3} \quad (217)$$

dengan D_{S3} merupakan *duty cycle* saklar S_3 .

Mode pengereman *boost*

Pada mode pengereman dimana keadaan emf balik bernilai lebih kecil daripada tegangan baterai, konverter berfungsi menaikkan tegangan V_2 menjadi tegangan V_1 yaitu tegangan pengisian baterai. Pada kondisi ini pola pensaklaran yang digunakan adalah saklar S_2 berfungsi sebagai pencacah sehingga saklar S_2 bekerja secara ON/OFF. Saklar S_1 dapat difungsikan berkebalikan dengan saklar S_2 atau dapat selalu padam karena terdapat dioda D_1 yang mengalirkan arus pada saat saklar S_2 padam. Sedangkan saklar saklar S_3 selalu hidup dan saklar S_4 selalu padam.



Gambar 2.7. Rangkaian pengganti konverter mode pengereman *boost*.

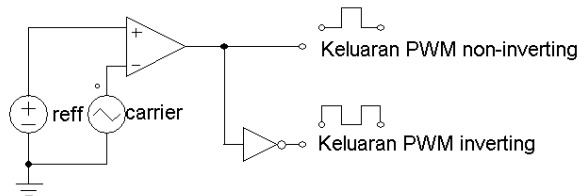
Dengan demikian konverter akan bekerja menaikan tegangan ke arah kiri dengan persamaan tegangan:

$$V_1 = \frac{V_2}{1-D_{S2}} \quad (2.18)$$

dengan D_{S2} merupakan *duty cycle* saklar S_2 .

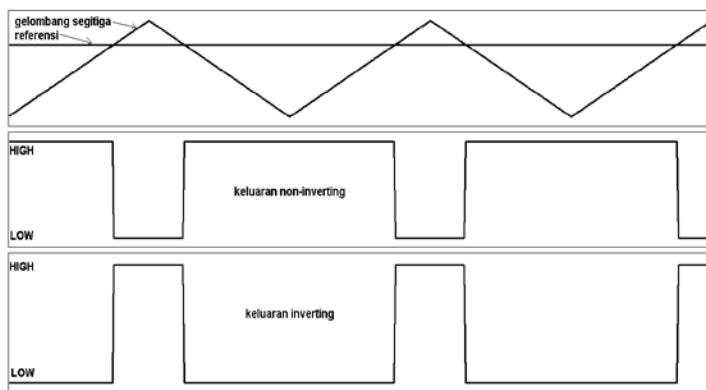
2.4 Pembangkit Sinyal Pensaklaran

Pada mode operasi konverter DC-DC buck boost terdapat empat macam pola pensaklaran yang dibutuhkan. Pensaklaran dapat diatur dengan cara memberikan tegangan pensaklaran pada saklar semikonduktor (mosfet) dengan *pulse width modulation* (PWM). Untuk didapatkan sinyal PWM yang sesuai dengan pola pensaklaran keempat saklar maka digunakan pembangkit sinyal pensaklaran sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. pembangkit sinyal pensaklaran

Pembangkitan sinyal menggunakan sinyal segitiga sebagai sinyal *carrier* dan sinyal referensi, sinyal referensi dibandingkan dengan sinyal segitiga sehingga didapatkan sinyal kotak dengan *duty cycle* tertentu berdasarkan nilai referensi yang diberikan. Dikarenakan pola pensaklaran saklar S_1 berkebalikan dengan saklar S_2 , dan pensaklaran S_3 berkebalikan dengan saklar S_4 , maka keluaran komparator dibagi menjadi dua macam yaitu keluaran tanpa pembalik (*non-inverting*) dan keluaran pembalik (*inverting*). Contoh bentuk gelombang PWM untuk penyalan mosfet ditunjukkan pada gambar 2.9.



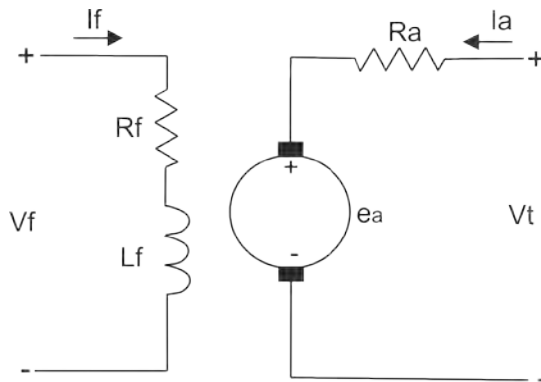
Gambar 2.9. Bentuk gelombang keluaran PWM

2.5 Motor DC

Motor DC adalah salah satu jenis mesin listrik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor DC memerlukan suplai tegangan arus searah (*direct current*) untuk bekerja. Lilitan jangkar pada mesin DC terletak pada bagian yang berputar (rotor). Motor DC memerlukan suplai tegangan DC, namun pada kumparan jangkar diperlukan tegangan bolak-balik (*alternative current*) untuk dapat berputar pada arah yang tetap. Sehingga pada motor DC diperlukan saklar yang dapat mengubah tegangan arus searah dari luar menjadi tegangan bolak-balik pada kumparan jangkar. Pada mesin DC konvensional saklar tersebut diberikan secara mekanis oleh suatu komutator, yakni sebuah silinder yang terbuat dari segmen tembaga yang masing-masing diisolasi satu sama lain oleh mika yang terpasang pada poros rotor. Sikat karbon dipasang tetap berhadapan dengan

permukaan komutator dan berfungsi menghubungkan lilitan jangkar dengan terminal luar jangkar. Sehingga jenis motor DC tersebut dinamakan motor DC sikat (*brushed* DC motor). Selain menggunakan komutator, saklar tersebut dapat digantikan oleh saklar semikonduktor sehingga tidak memerlukan sikat karbon, jenis motor DC ini disebut sebagai motor DC tanpa sikat (*brushless* DC motor) [4].

Pada motor DC dibutuhkan kumparan medan yang berfungsi membangkitkan medan eksitasi. Eksitasi pada motor DC dapat dilakukan secara terpisah, secara seri, secara paralel dan secara majemuk [4]. Pada eksitasi medan secara terpisah, kumparan medan terpisah dari jangkar sehingga besarnya medan eksitasi hanya dipengaruhi oleh besarnya tegangan eksitasi dan tidak dipengaruhi oleh tegangan ataupun arus jangkar. Rangkaian pengganti motor DC eksitasi terpisah ditunjukkan oleh gambar 2.10.



Gambar 2.10. motor DC eksitasi terpisah

Jika pada terminal jangkar motor diberikan sumber tegangan tetap sebesar V_t , maka pada kumparan jangkar akan mengalir arus sebesar I_a dan akan terbangkitkan gaya gerak listrik (ggl) E_a pada kumparan jangkar berdasarkan persamaan [4]:

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.19)$$

Besarnya arus yang melewati jangkar adalah sebesar

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \quad (2.20)$$

Pada motor DC besarnya ggl E_a yang terbangkitkan bernilai lebih kecil daripada tegangan terminal V_t [6]. Namun pada saat motor DC

bekerja sebagai generator, ggl E_a lebih besar daripada tegangan terminal motor. Sehingga pada motor DC arah aliran arus I_a mengalir dari suplai tegangan terminal menuju kedalam. Sedangkan saat motor DC bekerja sebagai generator, arah arus I_a mengalir dari kumparan jangkar menuju keluar.

Pada saat motor DC bekerja sebagai generator, besarnya ggl E_a yang terinduksi pada kumparan jangkar dapat ditentukan melalui persamaan [4].

$$E_a = K\phi\omega_m \quad (2.21)$$

Dengan E_a adalah ggl terinduksi, K adalah konstanta motor, ϕ adalah fluks magnetik dan ω_m adalah kecepatan putaran motor (rad/s). Pada motor DC eksitasi terpisah besarnya fluks ϕ diatur bernilai konstan dengan cara memberikan tegangan eksitasi V_f konstan, sehingga besarnya ggl terinduksi hanya dipengaruhi oleh besarnya kecepatan putaran motor.

Besarnya torsi elektromagnetik T_{em} pada motor DC dapat ditentukan menggunakan persamaan [4].

$$T_{em} = K\phi I_a \quad (2.22)$$

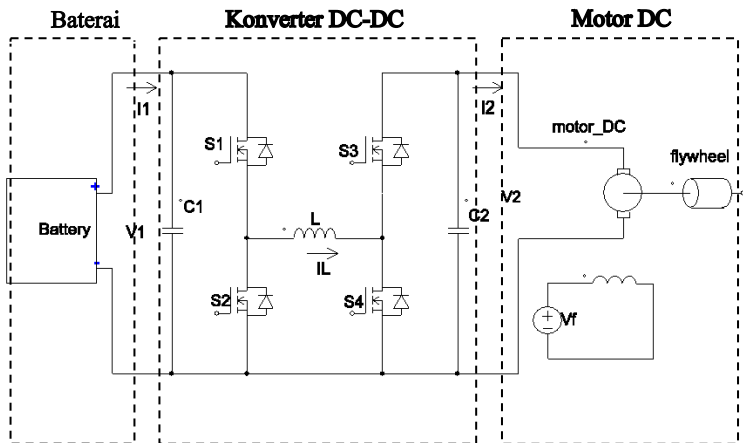
Dengan nilai K adalah konstanta motor, ϕ adalah fluks magnetik dan I_a adalah arus jangkar.

BAB 3

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC-DC *BUCK BOOST* DUA ARAH

3.1 Konfigurasi Sistem

Topologi konverter DC-DC *buck boost* dua arah pada tugas akhir ini menggunakan baterai sebagai sumber tegangan V_1 , rangkaian konverter DC-DC *buck boost* dua arah, dan motor DC. Baterai berfungsi sebagai sumber tegangan pada saat mode akselerasi sekaligus berfungsi menyimpan energi dari motor pada saat mode pengereman. Motor DC berfungsi sebagai beban yaitu mengubah energi listrik menjadi energi mekanis pada saat mode akselerasi sekaligus sebagai generator yaitu mengubah energi mekanis menjadi energi listrik pada saat mode pengereman. Dengan demikian konverter DC-DC mempunyai dua fungsi yaitu untuk mengalirkan daya dari baterai menuju motor dan sebaliknya. Konfigurasi sistem konverter dan peralatan lainnya ditunjukkan oleh gambar 3.1.



Gambar 3.1. Konfigurasi sistem konverter DC-DC *buck boost* dua arah

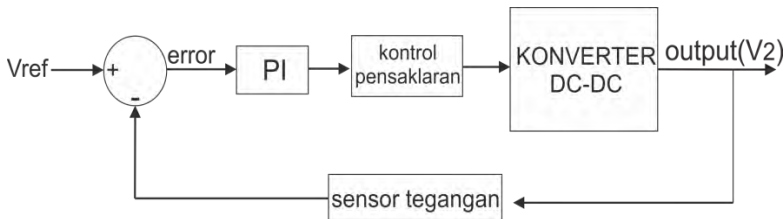
Konverter DC-DC *buck boost* merupakan konverter yang dapat bekerja menurunkan tegangan (*buck*) dan menaikkan tegangan (*boost*). Mekanisme kerja konverter sehingga dapat menurunkan atau menaikkan

tegangan ditentukan oleh pensaklaran S_1 , S_2 , S_3 dan S_4 . Pensaklaran nyala dan padam dari keempat saklar tersebut diatur menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM).

Seperti pada penjelasan diatas, konverter ini berfungsi mengalirkan daya secara dua arah, sehingga dibutuhkan mekanisme kontrol yang berfungsi mengatur konverter untuk dapat bekerja pada dua keadaan tersebut.

3.1.1 Mode Akselerasi

Pada mode akselerasi konverter berfungsi mengalirkan daya dari baterai menuju beban motor DC. Diagram kontrol pada mode ini seperti ditunjukan pada gambar 3.2 menggunakan sistem loop tertutup dimana sistem akan memberikan umpan balik berupa tegangan motor (V_2) yang akan dibandingkan dengan tegangan referensi yang diinginkan (V_{ref}). Kontrol umpan balik pada mode ini menggunakan kontrol *proportional integral* (PI) yang berfungsi memperbaiki respon sehingga didapatkan tegangan motor yang sama dengan tegangan yang diinginkan. Pada sistem ini kontrol PI sangat dibutuhkan terutama pada kondisi tegangan baterai berubah-ubah akibat pengaruh *state of discharge* (SOD) dan kondisi baterai. Pada saat SOD baterai rendah, tegangan *open circuit* baterai akan lebih kecil daripada tegangan normal baterai, begitu pula sebaliknya.



Gambar 3.2. Diagram kontrol mode akselerasi

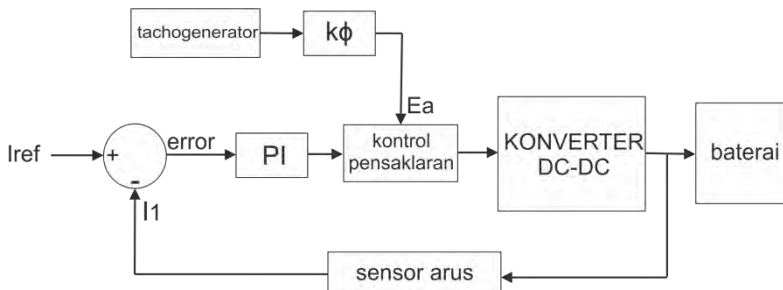
Pada saat V_{ref} bernilai kurang dari tegangan baterai (V_1), dengan kata lain tegangan motor (V_2) yang diinginkan bernilai lebih kecil daripada tegangan baterai, maka kontrol mode akselerasi akan mengatur pensaklaran S_1 dan S_2 sedangkan saklar S_3 selalu menyala dan saklar S_4 selalu padam. Dengan demikian saklar S_1 akan berfungsi sebagai saklar pencacah (*chopper switch*) [3]. Dengan demikian konverter akan bekerja

menurunkan tegangan (*buck*) dengan *duty cycle* (D) konverter sama dengan *duty cycle* saklar S_1 .

Pada saat V_{ref} bernilai lebih besar dari tegangan baterai, dengan kata lain tegangan motor yang dikehendaki lebih besar daripada tegangan baterai, maka kontrol mode akselerasi akan mengatur saklar S_1 selalu menyala, saklar S_2 selalu padam, saklar S_3 dan S_4 dinyalakan secara bergiliran. Saklar S_4 bekerja sebagai saklar pencacah (*chopper switch*) [3]. Dengan demikian konverter akan bekerja menaikkan tegangan (*boost*) dengan *duty cycle* (D) sistem konverter sama dengan *duty cycle* saklar S_4 .

3.1.2 Mode Pengereman Regeneratif

Pada mode pengereman konverter berfungsi mengalirkan daya pengereman motor DC (pada kondisi ini bekerja sebagai generator) yang dialirkan menuju baterai untuk disimpan. Diagram kontrol pada mode ini seperti ditunjukkan pada gambar 3.3 menggunakan sistem loop tertutup. Berbeda dengan mode akselerasi, pada mode pengereman umpan balik yang diberikan berupa nilai arus pengisian baterai (I_1) yang selanjutnya akan dibandingkan dengan arus referensi (I_{ref}) sehingga didapatkan nilai arus pengisian baterai sebesar yang dikehendaki. Hal ini dilakukan dengan tujuan melakukan pengereman pada motor dengan daya yang konstan dan sekaligus melindungi baterai dengan cara membatasi arus pengisian. Kontrol mode pengereman menggunakan *proportional integral* (PI) yang berfungsi memperbaiki respon sistem agar didapatkan arus pengisian baterai sesuai yang diinginkan. Kontrol PI sangat penting dikarenakan besarnya tegangan pada sisi motor DC (V_2) sangat dipengaruhi oleh kecepatan motor dan arus yang diambil dari motor itu sendiri.



Gambar 3.3. Diagram kontrol mode pengereman regeneratif

Sama seperti mode akselerasi, pada mode pengereman konverter dapat bekerja menurunkan dan menaikkan tegangan. Konverter akan bekerja menurunkan tegangan (*buck*) pada saat nilai emf balik (*back emf*) lebih besar daripada tegangan pengisian baterai. Sebaliknya konverter akan bekerja menaikkan tegangan (*boost*) pada saat nilai emf balik lebih kecil daripada tegangan pengisian baterai. Saat konverter bekerja pada mode pengereman *buck*, saklar S_3 dan S_4 diatur penyalanya agar didapatkan arus pengisian baterai sesuai yang diinginkan, sementara itu saklar S_1 selalu menyala dan saklar S_2 selalu padam. Besarnya *duty cycle* (D) konverter sama dengan *duty cycle* saklar S_3 . Saat konverter bekerja pada mode pengereman *boost*, saklar S_1 dan S_2 diatur penyalanya, sementara itu saklar S_3 selalu menyala dan saklar S_4 selalu padam. Besarnya *duty cycle* sistem sama dengan *duty cycle* saklar S_2 .

3.2 Penentuan Parameter Sistem

Penentuan nilai komponen yang digunakan pada simulasi dan implementasi konverter DC-DC buck boost dua arah dilakukan berdasarkan desain konverter. Konverter didesain untuk implementasi menggunakan baterai sebagai sumber tegangan V_1 sebesar 24V dan dapat menaikkan tegangan menjadi V_2 sebesar 50V agar dapat memutar motor DC guna pengujian pada pengereman regeneratif.

Saat konverter bekerja menaikkan tegangan dari V_1 sebesar 24V menjadi V_2 sebesar 50V, arah aliran daya mengalir dari sisi V_1 menuju V_2 , mode ini dinamakan mode akselerasi *boost*. Perhitungan *duty cycle* (D) konverter saat mode akselerasi adalah sebagai berikut.

$$D = 1 - \frac{V_1}{V_2} \quad (3.1)$$

$$D = 1 - \frac{24}{50} = 0,52$$

Saat konverter bekerja menurunkan tegangan dari V_2 sebesar 50V menjadi V_1 sebesar 24V, arah aliran daya mengalir dari V_2 menuju V_1 , mode ini dinamakan mode pengereman regeneratif *buck*. *Duty cycle* pada mode ini dapat dihitung sebagaimana berikut.

$$D = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.2)$$

$$D = \frac{24}{50} = 0,48$$

Konverter didesain agar dapat menghantarkan daya sebesar 200W. Parameter desain konverter ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parameter desain rangkaian konverter DC-DC *buck boost* dua arah

Parameter rangkaian	Nilai
V_1/V_{baterai}	24V
V_2/V_{motor}	50V
P_{out}	200W
I_1	8A
I_2	4A
Frekuensi (f)	23.47KHz

3.2.1 Perhitungan Nilai Induktor L

Penentuan nilai induktor dilakukan dengan tujuan riak arus pada induktor tidak melebihi 5% dari arus sesuai desain. Besarnya riak arus yang dikehendaki adalah sebesar.

$$dI_L = 5\% \times 8 = 0.4A$$

Sehingga nilai induktor L berdasarkan nilai riak arus (dI_L) yang dikehendaki dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [7] .

$$V_1 = L \frac{dI}{dt_{\text{on}}} \quad (3.3)$$

$$L = V_1 \frac{dt_{\text{on}}}{dI} \quad (3.4)$$

$$L = 24 \frac{0.5 \times 42.6 \times 10^{-6}}{0.4} = 1.28mH$$

3.2.2 Perhitungan Nilai Kapasitor C_1 dan C_2

Pada konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini diperlukan kapasitor untuk memperhalus riak tegangan. Pada sisi baterai dipasang kapasitor C_1 dan pada sisi motor DC dipasang kapasitor C_2 . Perhitungan nilai kedua kapasitor tersebut dilakukan berdasarkan desain sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.1.

Pada sisi V_1 , yaitu sisi tegangan 24V, pemilihan kapasitor dilakukan dengan tujuan agar riak tegangan pada sisi V_1 tidak lebih dari 0,5%. Pada saat kapasitor C_1 melakukan pengisian, besarnya perubahan muatan yang tersimpan pada kapasitor berdasarkan ref[7] adalah sebesar.

$$\Delta Q = C_1 \times \Delta V_1 \quad (3.5)$$

Sedangkan perubahan muatan ΔQ bernilai sebesar.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \times \frac{T}{2} \times \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.6)$$

Sehingga dengan substitusi persamaan (3.5) ke dalam persamaan (3.6) didapatkan.

$$C_1 = \frac{\Delta I_L \times T}{8 \times \Delta V_1} \quad (3.7)$$

Dengan ΔV_1 yang dikehendaki sebesar 0.12V, nilai kapasitor C_1 dapat dihitung sebagaimana berikut.

$$C_1 = \frac{0.4 \times 42.67 \times 10^{-6}}{8 \times 0.12} = 17.8 \mu F$$

Sedangkan pada sisi V_2 , pemilihan kapasitor C_2 dilakukan dengan tujuan riak tegangan pada sisi V_2 tidak lebih dari 0,5%. Besarnya riak tegangan adalah sebesar.

$$\Delta V_2 = 0.5\% \times 50 = 0.25V$$

Sehingga nilai kapasitor C_2 dapat dihitung menggunakan persamaan berikut[7] .

$$C_2 = I_2 \frac{dt_{on}}{\Delta V_2} \quad (3.8)$$

$$C_2 = 4 \frac{0.5 \times 42.6 \times 10^{-6}}{0.25} = 340.8 \mu F$$

3.3 Simulasi Konverter

Pada simulasi konverter ini dibagi menjadi dua bagian yaitu saat konverter bekerja menaikkan tegangan (*boost*) dari V_1 menuju V_2 dan menurunkan tegangan (*buck*) dari V_2 menuju V_1 . Simulasi dilakukan menggunakan *software* PSIM dan nilai parameter yang digunakan merupakan parameter desain sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.1. Komponen yang digunakan pada simulasi adalah komponen ideal.

3.3.1 Simulasi Mode Akselerasi *Boost*

Pada simulasi konverter mode akselerasi *boost*, konverter bekerja menaikkan tegangan V_1 sebesar 24V menjadi tegangan V_2 sebesar 50V. Konverter diuji dengan daya sebesar 200W, dengan demikian besarnya arus keluaran (I_2) diatur sebesar 4A dengan cara memberikan beban resistif (R_L) sebesar.

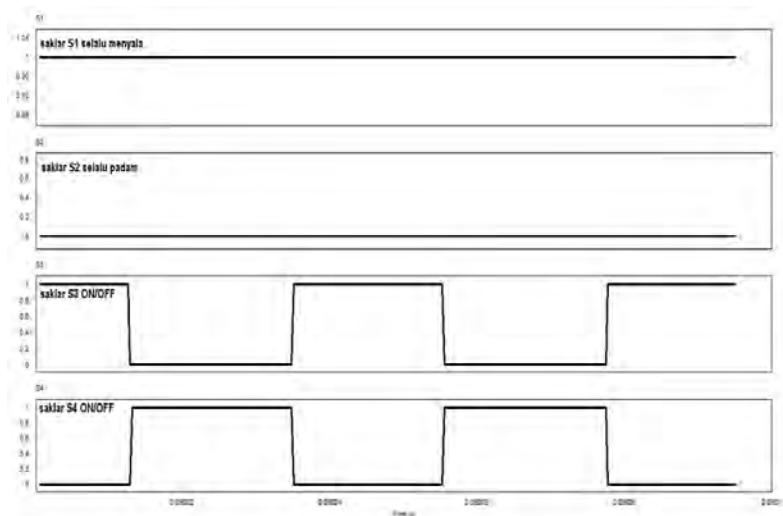
$$R_L = \frac{V_2}{I_2} = \frac{50}{4} = 12.5 \text{ ohm} \quad (3.9)$$

Parameter lain yang digunakan pada simulasi konverter mode akselerasi *boost* ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2.Parameter simulasi konverter mode akselerasi boost

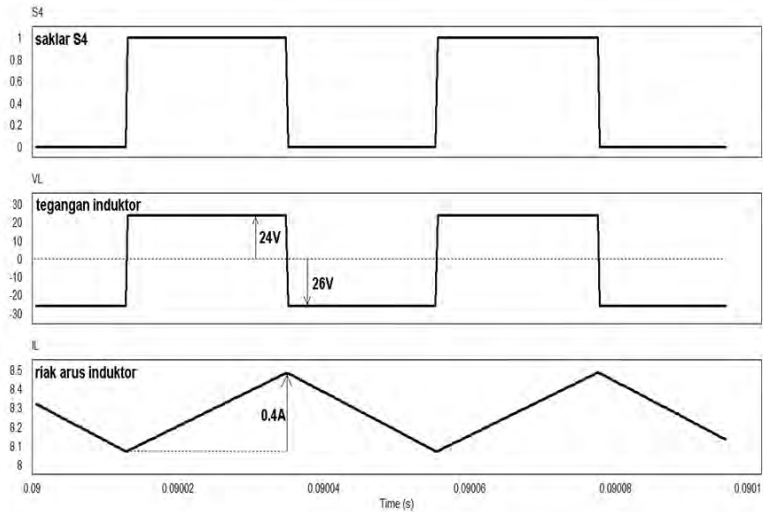
Parameter	Nilai
V_1 (tegangan <i>input</i>)	24V
C_2 (kapasitor sisi <i>output</i>)	341uF
L	1.28mH
<i>duty cycle</i> (D) saklar S4	0.52
R_L	12.5Ohm

Grafik pensaklaran pada mode akselerasi *boost* ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Pensaklaran pada mode akselerasi *boost*.

Pada rangkaian pengganti konverter saat bekerja pada mode akselerasi *boost*, saklar yang berfungsi sebagai pencacah adalah saklar S4. Seperti ditunjukkan pada gambar 3.4, saklar S3 bekerja berkebalikan dengan saklar S3. Saklar S1 selalu menyala, sedangkan saklar S2 selalu padam. Dengan demikian pada saat saklar S4 menyala, pada induktor dilakukan pengisian, sedangkan saat saklar S4 padam, pada induktor dilakukan pengkosongan. Bentuk tegangan dan arus induktor saat pengisian dan pengkosongan pada simulasi ditunjukkan oleh gambar 3.5.



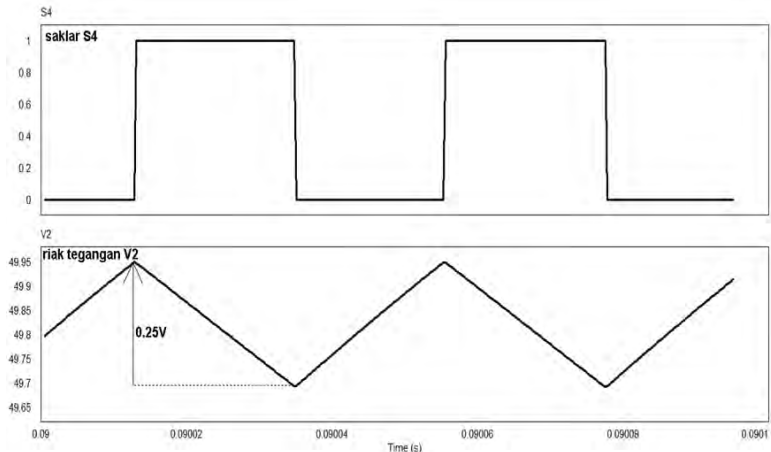
Gambar 3.5. Tegangan dan arus induktor pada mode akselerasi *boost*.

Dari gambar 3.5 terlihat pada saat saklar S_4 menyala, tegangan induktor sama dengan tegangan masukan (V_1) yaitu sebesar 24V dan arus yang melewati induktor bernilai naik. Arus pada kondisi ini merupakan arus pengisian induktor. Sedangkan pada saat pengosongan induktor, yaitu saat saklar S_4 padam, tegangan induktor bernilai sama dengan tegangan keluaran (V_2) dikurangi tegangan masukan (V_1), yaitu sebesar 26V. Pada saat pengosongan, arus yang mengalir adalah arus pengosongan induktor. Pada simulasi induktor bersifat induktif murni (tidak mempunyai besaran resistansi) maka arus akan membentuk kurva linier yang turun [1]. Besarnya kenaikan dan penurunan arus pada induktor adalah bernilai sama. Dari gambar 3.5 dapat terlihat besarnya riak arus induktor pada simulasi adalah sebesar 0.4A. Besarnya riak arus hasil simulasi sudah sesuai dengan nilai riak yang diinginkan pada perhitungan desain konverter.

Pada simulasi konverter mode akselerasi *boost*, besar riak tegangan V_2 adalah selisih antara puncak atas dan puncak bawah gelombang tegangan.

$$V_{riak} = |V_{max} - V_{min}| \quad (3.10)$$

Pada simulasi konverter mode akselerasi *boost* ini riak tegangan V_2 ditunjukkan oleh gambar 3.6.



Gambar 3.6. Riak tegangan V_2 pada mode akselerasi *boost*.

Pada saat saklar S_4 padam, pada kapasitor dilakukan pengisian, tegangan V_2 pada kondisi ini merupakan tegangan pengisian kapasitor. Sedangkan pada saat saklar S_4 menyala, pada kapasitor dilakukan pengkosongan, sehingga pada kondisi ini tegangan V_2 adalah tegangan pengkosongan kapasitor dan muatan yang tersimpan dalam kapasitor dialirkan menuju beban.

Nilai riak tegangan V_2 pada simulasi sebesar 0.25V sehingga besarnya riak tegangan sudah sesuai dengan riak yang diinginkan pada perhitungan nilai komponen C_2 yang digunakan.

3.3.2 Simulasi Mode Pengereman *Buck*

Pada simulasi konverter mode pengereman buck, konverter bekerja menurunkan tegangan V_2 sebesar 50V menjadi tegangan V_1 sebesar 24V. Dengan demikian tegangan V_2 merupakan tegangan masukan (*input*) dan tegangan V_1 merupakan tegangan keluaran (*output*) konverter. Konverter diuji pada daya sesuai desain, yaitu sebesar 200W, dengan demikian arus keluaran konverter (I_1) diatur sebesar 8A dengan cara memberikan beban resistif pada sisi V_1 sebesar.

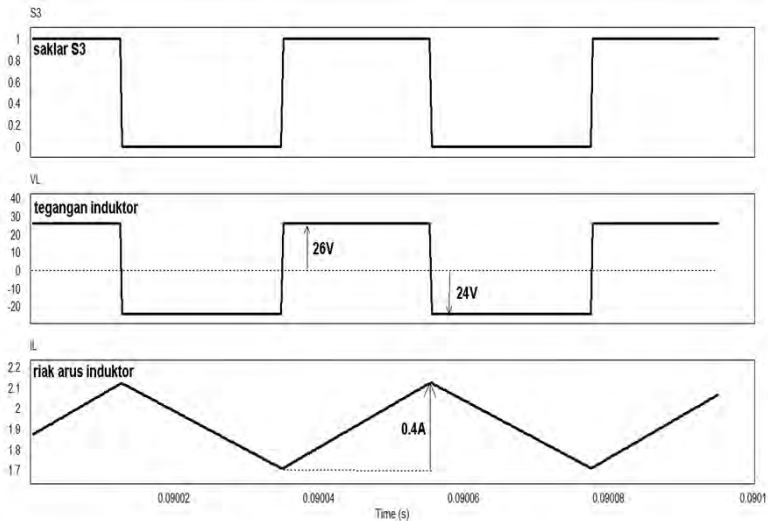
$$R_L = \frac{V_1}{I_1} = \frac{24}{8} = 3 \text{ ohm}$$

Parameter yang digunakan pada simulasi konverter mode pengereman *buck* ditunjukkan oleh tabel 3.3.

Tabel 3.3. Parameter simulasi konverter mode pengereman *buck*.

Parameter	Nilai
V2 (tegangan <i>input</i>)	50V
C1 (kapasitor sisi <i>output</i>)	17.8uF
L	1.28mH
duty cycle saklar S3	0,48
R_L	3Ohm

Pensaklaran pada mode pengereman *buck* ini sama dengan pensaklaran mode akselerasi boost pada sub bab 3.3.1. Namun yang berperan sebagai pencacah pada mode ini adalah saklar S3. Saat saklar S3 menyala, pada di induktor dilakukan pengisian, sedangkan saat saklar S3 padam, pada induktor dilakukan pengkosongan. Bentuk tegangan dan riak arus induktor saat pengisian dan pengkosongan ditunjukkan pada gambar 3.7.

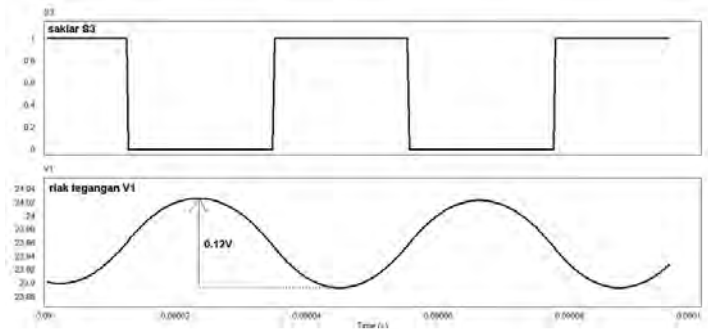


Gambar 3.7. Tegangan dan arus induktor pada mode pengereman *buck*.

Pada saat pengisian, yaitu saat saklar S3 menyala, tegangan induktor bernilai sebesar V_2 dikurangi V_1 , yaitu sebesar 26V. Pada kondisi ini arus pengisian induktor bernilai naik. Pada saat pengkosongan induktor, yaitu saat saklar S3 padam, tegangan induktor bernilai sama dengan tegangan V_1 , yaitu sebesar 24V. Pada kondisi ini

arus induktor merupakan arus pengkosongan dan bernilai turun. Besarnya kenaikan dan penurunan arus pada induktor adalah bernilai sama. Dari gambar 3.7 dapat terlihat besarnya riak arus induktor pada simulasi adalah sebesar 0.4A. Besarnya riak arus hasil simulasi sudah sesuai dengan nilai riak yang diinginkan pada perhitungan desain konverter.

Pada simulasi konverter mode pengereman *boost* ini riak tegangan V_1 ditunjukkan oleh gambar 3.8.



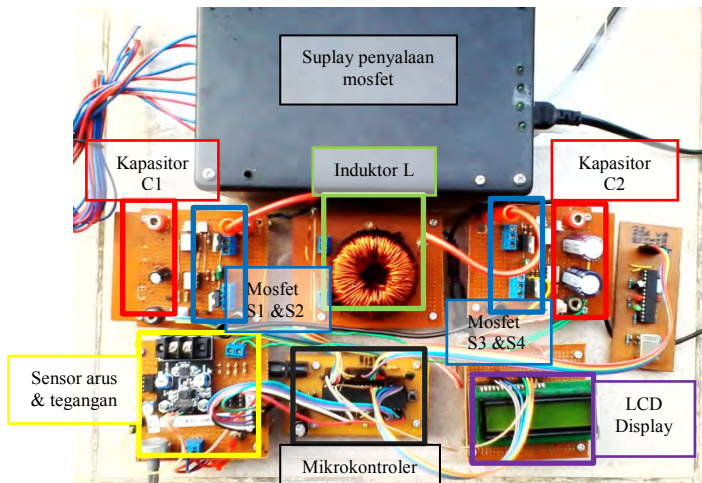
Gambar 3.8. Riak tegangan V_1 mode pengereman *buck*.

Pada saat saklar S_3 menyala, pada kapasitor dilakukan pengisian, tegangan V_1 pada kondisi ini merupakan tegangan pengisian kapasitor. Sedangkan pada saat saklar S_3 padam, pada kapasitor dilakukan pengkosongan, sehingga pada kondisi ini tegangan V_1 adalah tegangan pengkosongan kapasitor dan muatan yang tersimpan dalam kapasitor dialirkan menuju beban.

Nilai riak tegangan V_1 pada simulasi sebesar 0.12V, sehingga riak tegangan sudah sesuai dengan riak tegangan yang diinginkan pada perhitungan desain nilai komponen C_1 .

3.4 Implementasi Desain Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah

Rangkaian Konverter DC-DC *buck boost* dua arah pada implementasi terdiri dari induktor L , kapasitor C_1 dan C_2 , empat saklar mosfet, sensor arus, sensor tegangan, mikokontroler Atmega16, sumber DC 5V sebagai sumber penyalan mosfet, LCD guna menampilkan data dan komponen lainnya. Gambar rangkaian beserta penjelasan bagian-bagiannya ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9. Rangkaian konverter DC-DC *buck boost* dua arah

3.4.1 Induktor L

Berdasarkan perhitungan nilai induktor L, nilai induktor minimal yang digunakan adalah sebesar 1.28mH. Perhitungan jumlah lilitan yang diperlukan untuk mendapatkan induktor dengan nilai induktansi sebesar 1.28mH dihitung berdasarkan parameter inti besi yang digunakan.

Tabel 3.4 Parameter inti besi pada induktor toroida

Parameter Inti Besi	Nilai
Permeabilitas (μ)	7.5×10^{-5}
Luas penampang toroida (A)	$2.043 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Jari-jari (r)	$1.76 \times 10^{-2} \text{ m}$

Berdasarkan niai parameter diatas, digunakan rumus dibawah ini untuk mendapatkan induktor dengan nilai L sebesar 1.28mH.

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi r} \quad (3.11)$$

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot 2\pi r}{\mu \cdot A}} \quad (3.12)$$

$$N = \sqrt{\frac{1.28 \times 10^{-3} \times 2 \times 3.14 \times 1.76 \cdot 10^{-2}}{7.5 \times 10^{-5} \times 2.043 \times 10^{-4}}} = 96 \text{ lilitan}$$

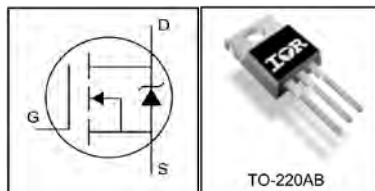
3.4.2 Kapasitor C_1 dan C_2

Berdasarkan perhitungan nilai kapasitor C_1 , besarnya kapasitansi kapasitor C_1 minimal adalah sebesar 17.8uF. Pada implementasi ini nilai kapasitor C_1 yang digunakan disesuaikan dengan nilai kapasitor yang ada dipasaran yaitu dua kapasitor 10uF dipasang secara paralel sehingga didapatkan kapasitansi total sebesar 20uF.

Sedangkan berdasarkan perhitungan nilai kapasitor C_2 , besarnya kapasitansi kapasitor C_2 minimal adalah sebesar 340uF. Pada implementasi ini nilai kapasitor C_2 yang digunakan disesuaikan dengan nilai kapasitor yang ada dipasaran sehingga kapasitor C_2 yang digunakan dua kapasitor 330uF dan 10 uF dipasang secara paralel sehingga bernilai total sebesar 340uF.

3.4.3 Mosfet

Jenis mosfet yang digunakan dalam implementasi konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini adalah mosfet IRF540N, yaitu mosfet *n-channel* buatan International Rectifier. Skema dan bentuk dari mosfet IRF540N ditunjukkan oleh gambar 3.10.

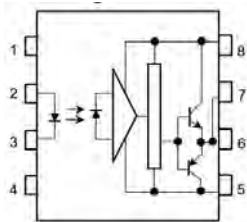


Gambar 3.10. Mosfet IRF540N [8]

IRF540N merupakan mosfet tipe *n-channel* sehingga membutuhkan tegangan penyalan (V_{gs}) positif agar mosfet dapat bekerja. Pada implementasi ini tegangan penyalan yang digunakan adalah sebesar 5V.

3.4.3 Driver Mosfet

Driver mosfet berfungsi sebagai penghubung antara sinyal PWM keluaran mikrokontroler dengan mosfet. Driver mosfet sangat dibutuhkan karena PWM keluaran mikrokontroler tidak diperkenankan tersambung secara langsung pada mosfet. Rangkaian driver mosfet pada implementasi ini menggunakan photocoupler tlp250 dan beberapa resistor.



Gambar 3.11. Konfigurasi pin pada photocoupler tlp250 [11]

Penjelasan kegunaan pin pada tlp250 adalah sebagai berikut.

- Pin nomor 1 dan 4 tidak digunakan
- Pin nomor 2 di hubungkan pada PWM keluaran mikrokontroler
- Pin nomor 3 dihubungkan pada ground mikrokontroler
- Pin nomor 8 dihubungkan pada Vcc sumber
- Pin nomor 5 di hubungkan pada ground sumber dan pada kaki *source* (S) mosfet
- Pin nomor 6 dan 7 dihubungkan pada kaki *gate* (G) mosfet

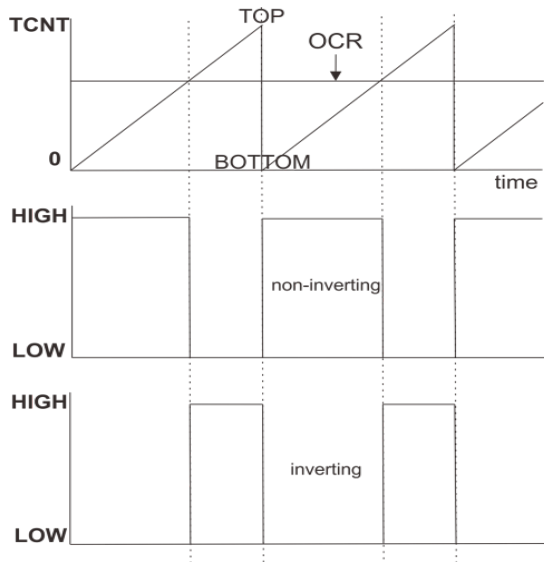
Pada implementasi ini keluaran pin nomor 6 dan 7 pada tlp240 dihubungkan pada resistor 100ohm sebelum masuk ke kaki gate pada mosfet, resistor ini berfungsi membatasi arus penyalan yang masuk ke mosfet. Sebuah resistor 100K dipasang secara paralel pada kaki G-S mosfet yang berfungsi membatasi arus pengkosongan pada saat mosfet dimatikan.

3.4.5 Pembangkitan Sinyal PWM dengan Mikrokontroler Atmega16

ATmega16 merupakan mikrokontroler keluarga AVR CMOS 8-bit buatan Atmel. Mikrokontroler AVR mempunyai 32 *register general-purpose*, *timer/counter* dengan metode *compare*, *interrupt* eksternal dan internal, serial UART, *programmable Watchdog Timer*, ADC dan PWM internal [10]

Pada implementasi Konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini menggunakan mikrokontroller Atmega16 sebagai pembangkit sinyal pensaklaran atau PWM. Pada mikrokontroler Atmega16 dapat digunakan *timer/counter* sebagai PWM. Pada mikrokontroler AVR terdapat timer yang berfungsi menghitung naik dari nilai 0 (*Bottom*) sampai nilai tertinggi (*Top*) sehingga membentuk gelombang segitiga gergaji. Terdapat pula sebuah nilai OCR yang berfungsi sebagai

referensi yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai pada timer, apabila nilai referensi tersebut bernilai lebih besar daripada nilai timer maka keluaran PIN tertentu pada mikrokontroler akan bernilai *high*. Gambar 3.12 menunjukkan diagram prinsip kerja timer/counter sebagai pembangkit sinyal PWM.

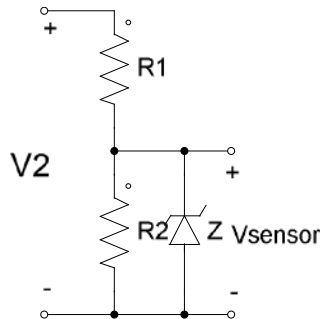


Gambar 3.12. Prinsip kerja *timer/counter* mikrokontroler AVR sebagai pembangkit sinyal PWM

Berdasarkan cara kerja tersebut dapat dibangkitkan sebuah sinyal yang memiliki periode yang tetap namun *duty cycle* dapat diatur dengan cara mengatur nilai OCR.

3.4.6 Sensor Tegangan

Sensor tegangan DC diperlukan guna membaca nilai tegangan pada sisi tegangan V_2 . Sensor tegangan menggunakan prinsip resistor pembagi tegangan sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.13. Pada implementasi konverter ini, tegangan pembacaan sensor dihubungkan pada pin *analog to digital* (ADC) mikrokontroler sehingga besarnya tegangan dapat terbaca.



Gambar 3.13. Resistor pembagi tegangan pada pada sensor tegangan.

Dengan persamaan

$$V_{sensor} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{motor} \quad (3.13)$$

Seperti ditunjukkan pada gambar 3.13, dioda zener 5V dipasang secara paralel pada resistor R_2 . Dioda zener tersebut berfungsi membatasi tegangan yang masuk ke pin DC mikrokontroler dengan cara mengalirkan arus melalui dioda zener pada saat tegangan V_{sensor} bernilai lebih dari 5V.

3.4.7 Sensor Arus

Konverter DC-DC *buck boost* dua arah memerlukan sensor arus yang dipasang pada sisi baterai yang berfungsi mengukur nilai arus pengisian baterai pada saat mode pengereman regeneratif. Pada implementasi ini sensor arus yang digunakan adalah tipe ACS712.

Sensor Arus ACS712 menggunakan teknologi *hall effect* yang menggantikan fungsi resistor shunt dan current transformer sehingga membuat sensor ini memiliki ukuran yang relatif jauh lebih kecil. Modul sensor arus ACS712 menggunakan IC sensor arus linier berbasis *Hall-Effect* ACS712 produksi Allegro[9].

3.4.8 Sensor Kecepatan

Pada implementasi ini diperlukan sensor kecepatan yang berfungsi mengukur kecepatan putaran motor DC. Besarnya nilai kecepatan motor selanjutnya digunakan untuk estimasi nilai emf balik yang terinduksi pada motor. Pada pengujian ini sensor kecepatan yang digunakan adalah tachogenerator yang dipasang satu poros dengan motor DC sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.14. Tachogenerator.

Tachogenerator dapat membangkitkan tegangan yang bernilai sebanding dengan kecepatan putaran. Besarnya tegangan yang dibangkitkan pada tachogenerator adalah

$$V_{out}(V) = \frac{N_{rpm}}{1000} \quad (3.14)$$

Sehingga dengan nilai V_{out} terukur dapat dihitung nilai kecepatan.

3.4.9 Baterai

Baterai yang digunakan pada implementasi konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini adalah dua baterai jenis *flooded lead-acid* yang dipasang secara seri dengan kapasitas masing-masing sebesar 35Ah. Besarnya tegangan pada kedua baterai setelah disusun secara seri tersebut adalah 24V. Baterai jenis *flooded lead-acid* bukanlah jenis baterai yang umum digunakan pada kendaraan listrik. Pada pengerjaan tugas akhir ini, baterai hanya berfungsi sebagai sumber tegangan DC.



Gambar 3.15. Dua buah baterai aki per 12V.

3.4.10 Motor DC dan Beban *Flywheel*

Motor DC yang digunakan pada implementasi ini adalah motor DC penguatan terpisah. Sumber tegangan eksitasi V_f sebesar 30V diberikan pada kumparan medan menggunakan sumber tegangan DC. Beban *flywheel* berupa piringan dikopel satu poros dengan motor DC sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.16.



Gambar 3.16. Motor DC beserta beban *flywheel*

Berdasarkan nameplate motor DC, rating kerja motor DC adalah sebagai berikut.

Tabel 3.5. Rating Motor DC

besaran	Nilai
Daya	300W
Tegangan motor	220 V
Arus jangkar	1.8 A
Tegangan eksitasi	220V
Arus eksitasi	0.3A
Kecepatan	2000rpm

Beban *flywheel* yang digunakan pada implementasi ini adalah berupa dua piringan logam besar dan kecil yang digabungkan bersama lalu dikopel satu poros dengan motor DC. Massa piringan logam besar dan kecil masing-masing adalah sebesar 1.7 kg dan 1.9 kg. Sedangkan jari piringan besar dan kecil masing-masing adalah sebesar 10.5cm dan

9.5 cm. Sehingga besaran inersia total kedua piringan tersebut adalah sebesar.

$$I_{\text{total}} = I_{\text{piringan besar}} + I_{\text{piringan kecil}} \quad (3.15)$$

$$I_{\text{total}} = \left(\frac{1}{2} \times 1.7 \times 0.105^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 1.9 \times 0.095^2\right)$$

$$I_{\text{total}} = 9.37 \times 10^{-3} + 8.57 \times 10^{-3}$$

$$I_{\text{total}} = 1.8 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2$$

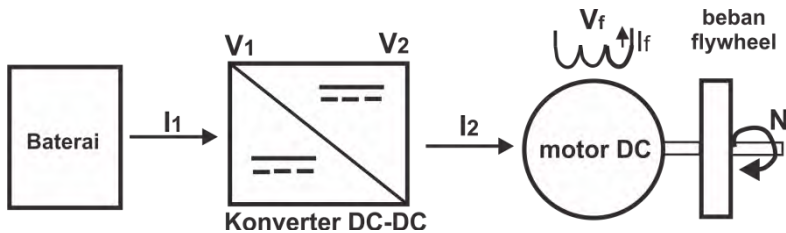
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL IMPLEMENTASI DAN ANALISIS DATA

4.1 Pengujian Konverter DC-DC *Buck Boost* Dua Arah

Pengujian konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini dibagi menjadi dua bagian yaitu mula-mula konverter bekerja mengalirkan daya dari baterai menuju ke beban motor DC hingga kecepatan motor DC mencapai keadaan *steady state*, bagian pertama ini disebut sebagai mode akselerasi. Bagian kedua yaitu setelah motor mencapai *steady state*, dilakukan pengereman regeneratif dengan cara memfungsikan motor DC sebagai generator dan membalikan arah aliran daya dari motor menuju baterai, bagian kedua ini disebut sebagai mode pengereman regeneratif. Diagram sistem pada implementasi ini ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. Diagram sistem konverter beserta sumber tegangan baterai dan beban motor DC

Seperti ditunjukkan pada gambar 4.1, sistem terdiri dari baterai, konverter DC-DC *buck boost* dua arah dan motor DC yang dikopel pada beban *flywheel*. Tegangan baterai merupakan tegangan V_1 pada sisi konverter dan arus pada baterai merupakan arus I_1 pada sisi konverter. Tegangan terminal motor DC merupakan tegangan V_2 pada sisi konverter dan arus jangkar motor DC merupakan arus I_2 pada sisi konverter.

Pada mode akselerasi, konverter bekerja dalam mode *boost* dengan menaikkan tegangan V_1 sebesar 24V menjadi V_2 sebesar 50V. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan mendapatkan kecepatan *steady state* motor yang cukup untuk pengujian selanjutnya yaitu pada mode pengereman regeneratif. Pada mode akselerasi sistem bekerja secara *loop* tertutup dengan umpan balik berupa nilai tegangan V_2 yang akan

dibandingkan dengan tegangan referensi (V_{ref}) dan di kontrol menggunakan kontrol *proportional intergral* (PI) agar didapatkan tegangan V_2 sebesar tegangan yang diinginkan.

Pada mode pengereman regeneratif, motor DC berfungsi sebagai generator dengan tegangan terinduksi pada kumparan jangkar sebesar E_a , tegangan tersebut dapat pula disebut sebagai emf balik. Berdasarkan persamaan 2.13 besarnya emf balik adalah sebanding dengan konstanta (K), fluks(ϕ) dan kecepatan putaran motor(ω_m). pada implementasi ini nilai fluks diatur konstan dengan cara mengatur konstan tegangan eksitasi (V_f) sehingga besarnya emf balik hanya tergantung pada kecepatan putaran motor. Nilai perkalian antara konstanta motor dengan fluks ($k.\phi$) diketahui berdasarkan pengujian motor sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil pengujian motor pada penentuan nilai $k.\phi$ motor DC

NO	N(rpm)	$E_a(V)$	$K.\phi = E_a/N$
1	100	3	0,03
2	200	7,15	0,03575
3	300	10,3	0,034333333
4	400	13,75	0,034375
5	500	17	0,034
6	600	20,4	0,034
7	700	23,7	0,033857143
8	800	27	0,03375
k. ϕ rata-rata =			0,033758185

Berdasarkan tabel 4.1 diketahui nilai $k.\phi$ pada motor DC yang digunakan sebesar 0,0337 sehingga hubungan antara N_{motor} dan emf balik adalah:

$$E_a = \frac{N_{motor}(rpm) \times 2\pi \times 0,0337}{60} V \quad (4.1)$$

Pada mode pengeraman regeneratif, pengereman dilakukan dengan cara mengatur konstan arus pengisian baterai(I_1). Hal tersebut dilakukan dengan tujuan agar didapatkan daya pengereman yang konstan dan sekaligus mengamankan baterai dari kelebihan arus pengisian pada saat

tegangan baterai rendah. Pada pengujian ini arus pengisian baterai diatur konstan sebesar 500mA.

Pada konverter DC-DC ini berlaku persamaan daya antara daya pada sisi baterai (P_1) dan daya pada sisi motor DC (P_2). Pada mode akselerasi, persamaan daya yang berlaku adalah sebagai berikut:

$$P_2 = P_1 - P_{\text{loss}} \quad (4.2)$$

Sedangkan pada mode pengereman regeneratif, persamaan daya yang berlaku adalah sebagai berikut:

$$P_1 = P_2 - P_{\text{loss}} \quad (4.3)$$

dengan nilai P_1 dan P_2 sebagai berikut:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \quad (4.4)$$

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \quad (4.5)$$

Dengan V_1 dan I_1 adalah tegangan dan arus pada sisi baterai dan V_2 dan I_2 adalah tegangan dan arus pada sisi motor DC.

4.2 Performa Konverter DC-DC Mode *Buck* dan *Boost*

Pengujian konverter dibagi menjadi dua bagian yaitu pengujian konverter mode akselerasi *boost* dan mode pengereman *buck*. Pengujian mode akselerasi *boost* dilakukan dengan menaikkan tegangan dari sisi V_1 sebesar 24V menuju tegangan sisi V_2 sebesar 50V. Bagian ini dinamakan mode akselerasi dikarenakan pada implementasi konverter menggunakan sumber energi baterai dan beban motor DC, mode ini mengalirkan daya dari baterai (V_1) menuju beban motor DC (V_2). Pada pengujian mode pengereman *buck*, konverter menurunkan tegangan V_2 sebesar 50V menjadi tegangan V_1 sebesar 24V. Mode ini dinamakan mode pengereman dikarenakan pada implementasi konverter menggunakan baterai dan motor DC, konverter mengalirkan daya dari sisi motor DC (V_2) menuju baterai (V_1). Nilai parameter pengujian konverter pada pengujian ini ditunjukkan oleh tabel 4.2.

Tabel 4.2. Parameter pengujian konverter

Parameter	nilai
tegangan V_1	24V
tegangan V_2	50V
Daya P	200W
induktor L	1.28mH
kapasitor C_1	20uF

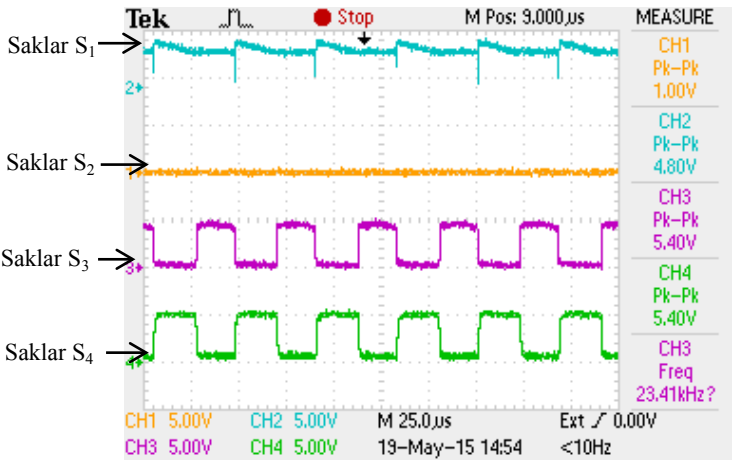
Tabel 4.2. Parameter pengujian konverter (lanjutan)

Parameter	nilai
kapasitor C_2	430uF
Frekuensi pensaklaran (f)	23.47KHz

Pada pengujian konverter, beban yang digunakan pada sisi V_2 pada mode akselerasi *boost* adalah resistor sebesar 12.5 Ohm sehingga dengan tegangan 50V arus yang melewati beban adalah sebesar arus beban penuh yakni sebesar 4A. Sebaliknya pada pengujian konverter mode pengereman *buck*, beban yang digunakan pada sisi V_1 adalah resistor sebesar 3 Ohm sehingga dengan tegangan sebesar 24V arus melewati beban adalah sebesar 8A. Selanjutnya pada pengujian dalam dua kondisi diatas pengamatan dilakukan menggunakan osiloskop pada gelombang tegangan dan arus induktor, riak tegangan keluaran konverter dan perbandingan tegangan V_1 dengan V_2 .

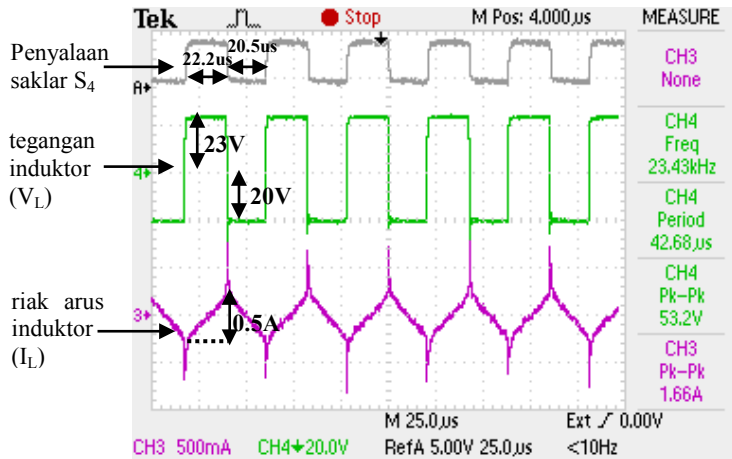
4.2.1 Mode Akselerasi *Boost*

Pada pengujian konverter mode akselerasi *boost*, konverter menaikan tegangan V_1 24V menjadi tegangan V_2 50V. *Duty cycle* yang digunakan pada pengujian ini adalah *duty cycle* perhitungan pada sub bab 3.2, sehingga pada pengujian ini konverter bekerja secara loop terbuka dimana tidak terdapat umpan balik tegangan V_2 . Pola pensaklaran konverter pada mode ini ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Penyalan keempat saklar pada mode akselerasi *boost*.

Pada saat konverter bekerja pada mode akselerasi *boost*, saklar S_4 berfungsi sebagai pencacah. Dengan demikian pada saat saklar S_4 menyala, pada induktor akan dilakukan pengisian, sedangkan pada saat saklar S_4 padam, pada induktor dilakukan pengkosongan. Bentuk tegangan dan riak arus induktor pada mode akselerasi *boost* pada pengujian ini ditunjukkan pada gambar 4.3.

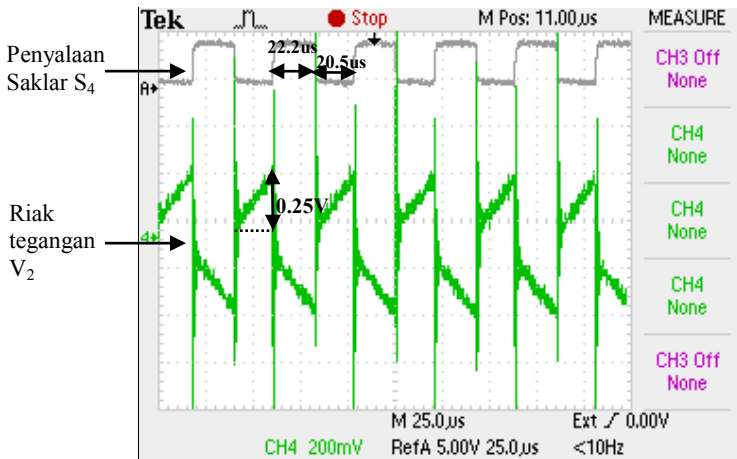


Gambar 4.3. Tegangan dan riak arus induktor pada mode akselerasi *boost*.

Seperti ditunjukkan pada gambar 4.3, tegangan induktor pada saat pengisian adalah sebesar 23V. Sedangkan pada simulasi, tegangan induktor pada saat pengisian seharusnya sama dengan tegangan masukan, yaitu sebesar 24V. Tegangan induktor pada saat pengkosongan pada implementasi adalah sebesar 21V. Sedangkan pada simulasi, tegangan induktor pada saat pengkosongan adalah sebesar 26V. Perbedaan nilai antara simulasi dan implementasi tersebut dikarenakan komponen yang digunakan pada implementasi tidak ideal sebagaimana komponen pada simulasi, dengan demikian pada implementasi dapat terjadi tegangan jatuh pada saklar, kabel, maupun komponen lain.

Riak arus induktor pada implementasi, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.3, bernilai sebesar 0.5A. Nilai tersebut lebih besar jika dibandingkan dengan riak arus yang diinginkan, yaitu sebesar 0.4A.

Kapasitor C_2 merupakan kapasitor yang berfungsi mengurangi riak tegangan pada sisi V_2 . Berbeda dengan induktor, waktu pengisian kapasitor C_2 adalah pada saat saklar S_4 padam dan dikosongkan pada saat saklar S_4 menyala. Bentuk gelombang riak tegangan V_2 ditunjukkan pada gambar 4.4.

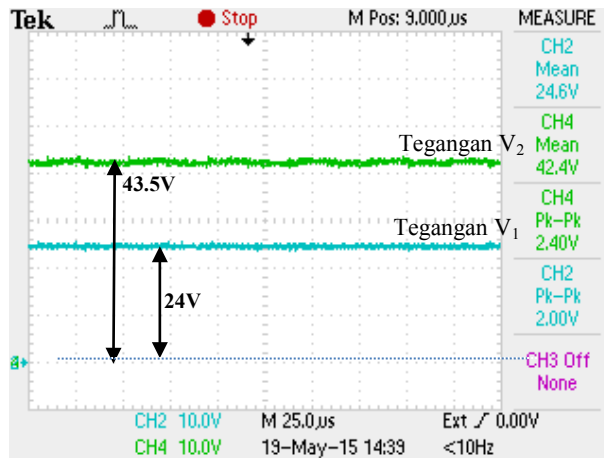


Gambar 4.4. Riak tegangan V_2 konverter pada mode akselerasi *boost*.

Riak tegangan V_2 pada implementasi teramati sebesar 250mV. Riak tegangan pada pengujian ini sama dengan riak tegangan sesuai perhitungan dan hasil simulasi.

Pada gambar 4.4 terlihat pada saat transisi dari pengisian menuju pengkosongan kapasitor C_2 terjadi penurunan tegangan. Hal tersebut tentunya menjadikan bentuk gelombang riak tegangan V_2 pada implementasi berbeda dengan bentuk gelombang pada simulasi. Hal tersebut dikarenakan pada implementasi konverter ini komponen yang digunakan merupakan komponen tidak ideal. Sedangkan pada simulasi semua komponen yang digunakan adalah komponen ideal.

Pada pengujian konverter mode akselerasi *boost*, tegangan V_1 pada sisi masukan konverter bernilai 24V dan tegangan V_2 yang dikehendaki adalah sebesar 50V. Namun pada implemementasi ini tegangan keluaran V_2 yang dihasilkan lebih kecil daripada 50V. Grafik tegangan V_1 dan V_2 pada saat implementasi ditunjukkan pada gambar 4.5.



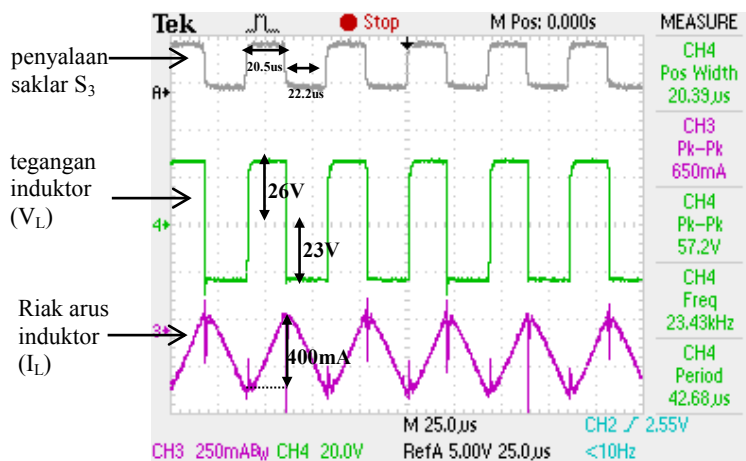
Gambar 4.5. perbandingan grafik tegangan V_1 dan V_2 konverter pada mode akselerasi *boost*.

Tegangan keluaran pada pengujian konverter mode akselerasi *boost*, yaitu tegangan V_2 , adalah sebesar 43.5V. Nilai tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan perhitungan dan hasil simulasi. Pada simulasi, tegangan V_2 konverter sebesar 50V, sehingga perbedaan tegangan pada implementasi dan simulasi adalah sebesar 6.5V. Perbedaan hasil tersebut dapat terjadi akibat komponen yang digunakan pada implementasi tidaklah ideal sebagaimana pada simulasi, sehingga terdapat tegangan jatuh pada komponen-komponen yang digunakan. Pada pengujian konverter mode akselerasi *boost* ini arus yang dialirkan pada konverter cukup tinggi, yaitu 8A pada sisi masukan dan 4A pada sisi keluaran, sehingga dengan arus yang cukup tinggi tersebut dapat menyebabkan tegangan jatuh pada tiap komponen semakin besar.

4.2.2 Mode Pengereman *Buck*

Pada mode pengereman *buck*, tegangan masukan V_2 merupakan sumber tegangan DC 50V dan tegangan keluaran V_1 yang dikehendaki sebesar 24V. *Duty cycle* pada pengujian mode ini sebesar *duty cycle* perhitungan pada sub bab 3.2, sehingga pada pengujian ini konverter bekerja secara loop terbuka dimana tidak terdapat umpan balik tegangan V_2 . Pola pensaklaran konverter pada pengujian mode ini sama dengan pensaklaran pada mode akselerasi *boost* yaitu sebagaimana ditunjukkan

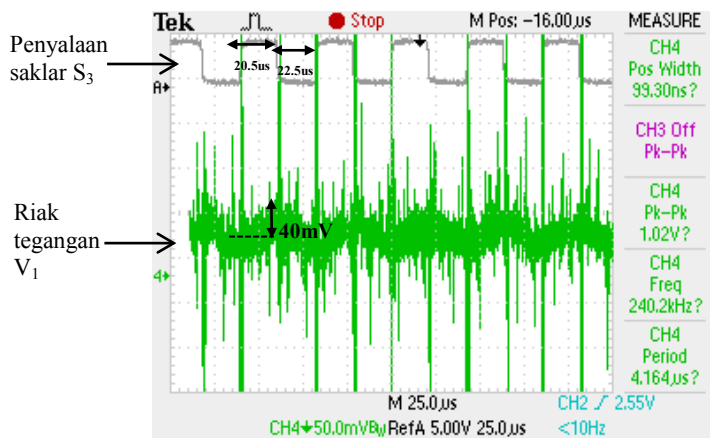
pada gambar 4.2. Bentuk tegangan dan arus induktor pada pengujian mode pengereman *buck* ini ditunjukkan oleh gambar 4.6.



Gambar 4.6 tegangan dan arus pada induktor L pada mode pengereman *buck*.

Tegangan induktor pada saat pengisian, yaitu saat saklar S_3 menyala, seperti ditunjukkan ada gambar 4.6 bernilai sebesar 26V. Nilai tegangan induktor tersebut sudah sesuai dengan hasil perhitungan dan simulasi. Sedangkan pada saat pengkosongan, yaitu saat saklar S_3 padam, tegangan induktor pada implementasi bernilai sebesar 23V, lebih kecil dibandingkan dengan hasil simulasi yaitu sebesar 24V. Riak arus induktor pada implementasi terukur sebesar 400mA. Nilai riak arus tersebut sudah sesuai dengan perhitungan awal dan hasil simulasi. Berdasarkan grafik gelombang arus induktor, dapat terlihat bahwa nilai arus pada induktor selama siklus pengisian dan pengkosongan tidak mencapai sama dengan nol, sehingga konverter bekerja secara *continuous conduction mode* (CCM).

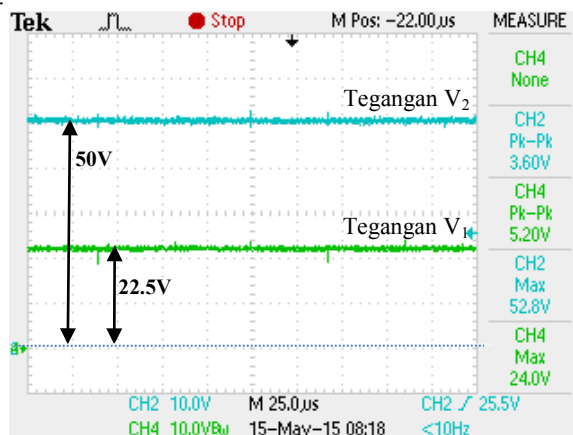
Pada konverter DC-DC dua arah ini, kapasitor C_1 merupakan kapasitor yang berfungsi mengurangi riak tegangan pada sisi V_1 . Sama halnya dengan induktor, waktu pengisian kapasitor C_1 adalah pada saat saklar S_3 menyala dan dikosongkan pada saat saklar S_3 padam. Bentuk gelombang riak tegangan V_1 pada implementasi ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Riak tegangan V_1 konverter pada mode pengereman *buck*.

Riak tegangan V_1 pada implementasi teramati sebesar 40mV. Sedangkan berdasarkan perhitungan dan simulasi, riak tegangan V_1 yang dikehendaki adalah sebesar 120mV. Sehingga riak tegangan pada pengujian ini bernilai lebih kecil daripada perhitungan dan simulasi.

Grafik tegangan V_1 dan V_2 pada implementasi ditunjukkan pada gambar 4.8.

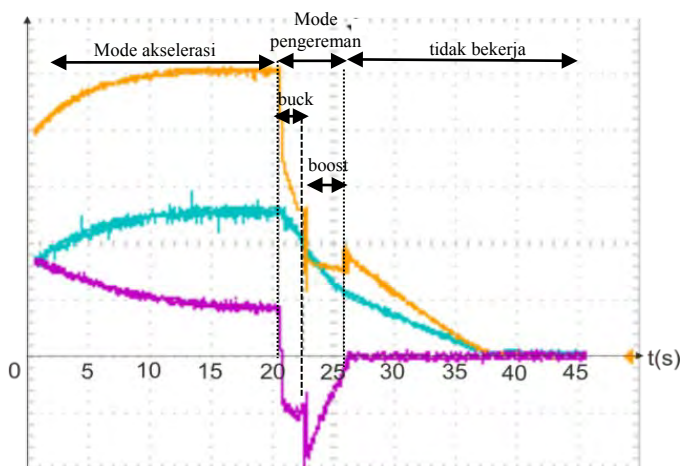


Gambar 4.8. Grafik tegangan V_1 dan V_2 konverter pada mode pengereman *buck*.

Pada pengujian konverter mode pengereman *buck*, tegangan V_1 yang dikehendaki pada sisi keluaran konverter bernilai 24V. Namun pada implementasi tegangan keluaran V_1 lebih kecil dari 24V, yaitu sebesar 22.5V. Selisih tegangan V_1 hasil simulasi dan implementasi adalah sebesar 1.5V. Selisih nilai tegangan tersebut dapat terjadi akibat komponen yang digunakan pada implementasi merupakan komponen yang tidak ideal, sedangkan pada simulasi semua komponen yang digunakan merupakan komponen ideal.

4.3 Analisis Performa Sistem pada Mode Akselerasi dan Pengereman Regeneratif

Pada pengujian Konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini mula-mula konverter bekerja pada mode akselerasi, yaitu mengalirkan daya dari sisi baterai (V_1) menuju motor DC (V_2) hingga didapatkan kecepatan motor *steady state*. Setelah mencapai keadaan *steady state* selanjutnya konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif, yaitu mengalirkan daya dari motor DC menuju baterai.



Keterangan:

CH1 : tegangan motor 10V/div

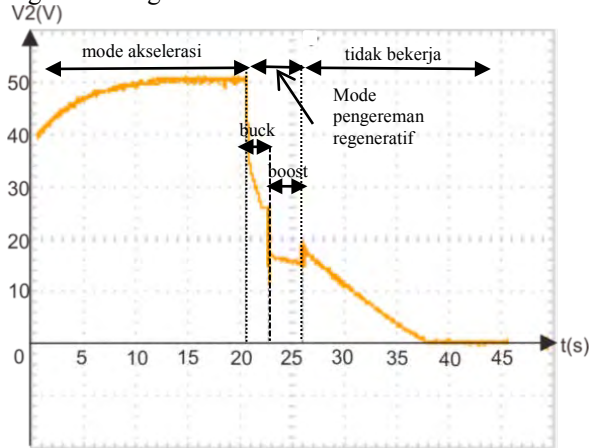
CH2 : kecepatan motor 500rpm/div

CH3 : arus jangkar motor 500mA/div

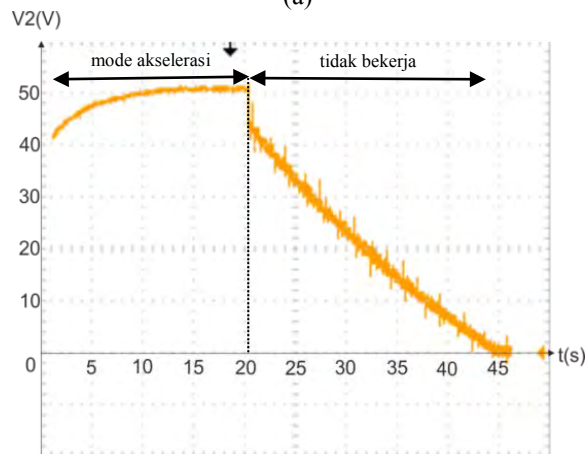
Gambar 4.9. Grafik tegangan terminal motor, arus jangkar dan kecepatan motor DC

4.3.1 Tegangan Terminal Motor DC

Pada mode akselerasi, konverter bekerja secara loop tertutup menggunakan kontrol *proportional integral* (PI) dengan V_{set} sebesar 50V dan kontrol umpan balik berupa tegangan V_2 . Gambar 4.10 menunjukkan grafik tegangan motor DC dengan pengereman regeneratif dan tanpa pengereman regeneratif.



(a)



(b)

Gambar 4.10. Tegangan terminal motor DC, (a) dengan pengereman regeneratif, (b) tanpa pengereman regeneratif.

Grafik tegangan motor DC pada pengujian ini dibagi menjadi 4 bagian.

- Mode akselerasi.

Konverter bekerja pada mode akselerasi pada saat $0 < t \leq 20.5$ detik. Tegangan V_2 konverter, yang juga merupakan tegangan terminal motor DC diatur sebesar 50V dengan tujuan agar didapatkan kecepatan putaran *steady state* motor yang cukup untuk pengujian mode selanjutnya, yaitu pengereman regeneratif. Tegangan motor diatur untuk tidak seketika bernilai 50V namun perlahan menuju 50V dengan tujuan mengurangi arus starting motor.

- Mode Pengereman Regeneratif

Pada saat $20.5 < t \leq 26$, konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif. Dengan demikian motor DC akan berfungsi sebagai generator dengan tegangan emf balik pada kumparan jangkar sebesar E_a . Pada kondisi ini arah aliran daya akan berubah dari motor DC menuju baterai. Pada mode pengereman regeneratif, besarnya emf balik dipengaruhi oleh kecepatan motor (ω_m), fluks (ϕ) dan konstanta (k) motor. Namun pada motor DC yang digunakan pada implementasi merupakan motor DC penguatan terpisah dengan tegangan eksitasi diatur konstan. Sehingga besarnya emf balik hanya dipengaruhi oleh kecepatan putaran motor saja.

Pada mode pengereman regeneratif, konverter dapat bekerja *buck* dan *boost*. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.10(a), konverter bekerja *buck* pada saat $t < 20.5 \leq 23$, yaitu selama 2.5 detik. Pada kondisi ini nilai emf balik motor DC lebih besar daripada tegangan baterai sehingga konverter menurunkan tegangan dari sisi V_2 menuju V_1 . Konverter bekerja menaikkan tegangan dari V_2 menuju V_1 pada saat emf balik motor DC bernilai lebih kecil daripada tegangan baterai. Kondisi ini ditunjukkan pada saat $23 < t < 26$, yaitu selama 3 detik.

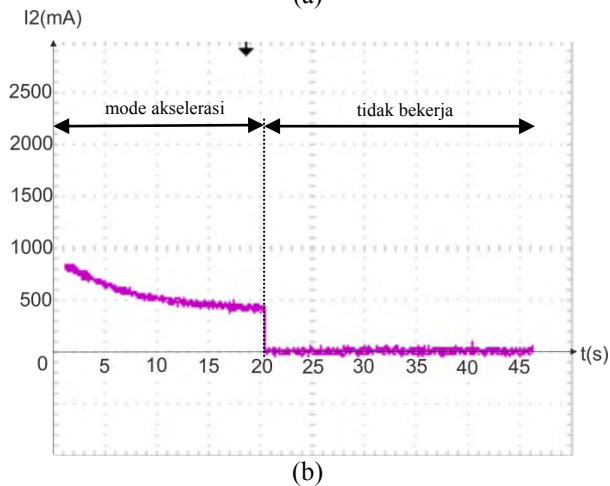
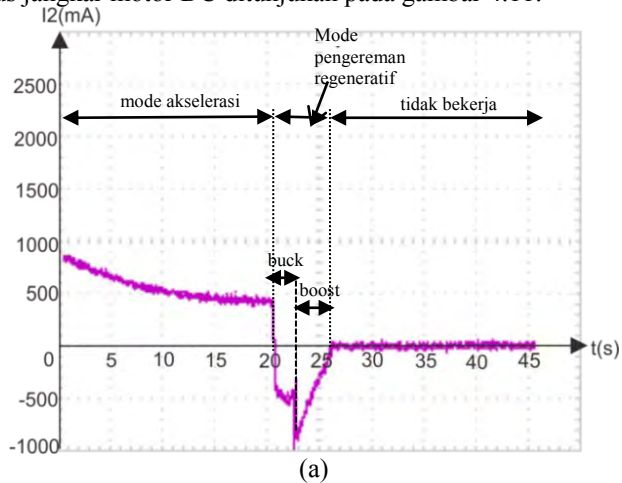
- Konverter Tidak Bekerja

Pada saat $26 < t \leq 38$, yaitu selama 12 detik, emf balik motor DC bernilai terlalu kecil sehingga tidak memungkinkan bagi konverter untuk mengalirkan daya dari motor menuju ke baterai. Dengan demikian konverter memutuskan aliran daya antara motor DC dan baterai.

Pada pengujian tanpa pengereman regeneratif, tegangan terminal motor sama dengan E_a dikarenakan arus jangkar bernilai nol sehingga tegangan terminal motor bernilai turun mengikuti penurunan kecepatan saja.

4.3.2 Arus jangkar Motor DC

Pada mode akselerasi, arus mengalir dari terminal motor menuju kumparan jangkar, sehingga arus jangkar bernilai positif. Sebaliknya pada mode pengereman regeneratif, arus mengalir keluar dari kumparan jangkar menuju terminal motor sehingga arus jangkar bernilai negatif. Grafik arus jangkar motor DC ditunjukkan pada gambar 4.11.



Gambar 4.11. Arus jangkar motor DC, (a) dengan pengereman regeneratif, (b) tanpa pengereman regeneratif

Pada pengujian konverter dengan pengereman regeneratif, arus jangkar pada motor DC dibagi menjadi 3 bagian.

- Mode Akselerasi

Konverter bekerja pada mode akselerasi pada saat $0 < t \leq 20.5$, yaitu selama 20.5 detik. Pada saat starting, arus jangkar bernilai relatif tinggi akibat belum terbangkitnya emf balik pada kumparan jangkar, namun secara perlahan turun seiring dengan kenaikan emf balik. Besarnya arus jangkar saat *steady state* mode akselerasi adalah sebesar 0.5A.

- Mode Pengereman Regeneratif

Pada saat $20.5 < t \leq 26$, konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif. Pada mode pengereman regeneratif, konverter dapat bekerja *buck* dan *boost*. Konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif *buck* pada saat $20.5 < t \leq 23$, yaitu selama 2.5 detik dan bekerja pada mode pengereman regeneratif *boost* pada saat $23 < t \leq 26$, yaitu selama 3 detik.

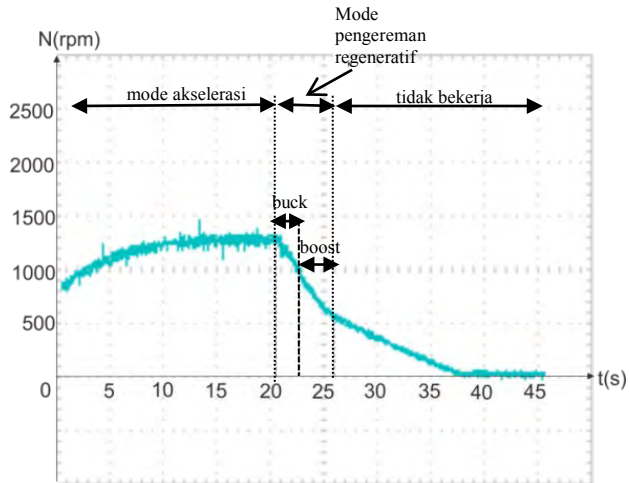
- Konverter Tidak Bekerja

Pada saat $t > 26$ konverter tidak lagi bekerja pada mode pengereman regeneratif dikarenakan emf balik motor DC yang terlalu kecil. Pada kondisi ini konverter memutuskan daya antara baterai dan motor, dengan demikian pada kondisi ini arus jangkar bernilai nol.

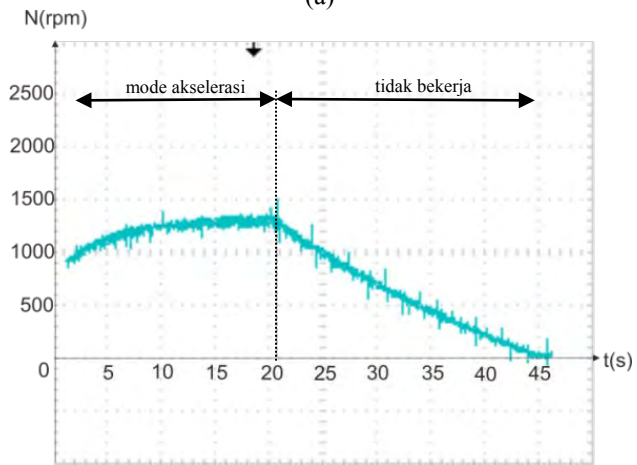
Seperti ditunjukkan pada gambar 4.11(a) dan 4.11(b), grafik arus jangkar motor dengan pengereman regeneratif berbeda dengan arus jangkar motor tanpa pengereman regeneratif. Pada pengereman regeneratif, terdapat arus yang dikembalikan menuju baterai melewati konverter dengan demikian arus jangkar bernilai negatif (berkebalikan arah dari mode akselerasi). Sedangkan pada pengujian konverter tanpa pengereman regeneratif, tidak terdapat arus yang dibalik dari motor DC menuju baterai sehingga tidak terdapat arus jangkar yang bernilai negatif.

4.3.3 Kecepatan Motor DC

Pada pengujian ini kecepatan motor DC pada mode akselerasi dan pengereman regeneratif diamati menggunakan osiloskop. Pada mode akselerasi, motor DC dipercepat hingga mencapai kecepatan *steady state*. Sedangkan pada mode pengereman regeneratif, kecepatan motor DC diperlambat dengan cara dibebani secara elektrik dengan mengalirkan daya kembali menuju baterai. Grafik kecepatan motor DC dengan pengereman regeneratif dan tanpa pengereman regeneratif ditunjukkan pada gambar 4.12.



(a)



(b)

Gambar 4.12. Grafik kecepatan motor DC, (a) dengan pengereman regeneratif, (b) tanpa pengereman regeneratif.

Sama halnya dengan tegangan terminal dan arus jangkar motor DC, grafik kecepatan motor DC dengan pengereman regeneratif dibagi menjadi 3 bagian.

- Mode Akselerasi

Konverter bekerja pada mode akselerasi pada saat $t \leq 20.5$. Pada kondisi ini motor DC diputar dari keadaan diam ($N=0\text{rpm}$) hingga mencapai kecepatan *steady state*. Kecepatan *steady state* pada pengujian ini adalah sebesar 1300rpm. Kecepatan motor DC tidak dapat seketika naik menuju 1300rpm pada saat starting, hal ini dikarenakan pada motor DC dan beban *flywheel* mempunyai sifat kelembaman.

- Mode Pengereman Regeneratif

Setelah motor DC diputar menuju kecepatan *steady state*, motor akan mempertahankan kecepatannya akibat adanya kelembaman pada motor dan beban *flywheel*. Pada kendaraan listrik, putaran motor dapat pula didapat pada saat melewati jalan menurun. Pengereman regeneratif pada motor dengan cara mengalirkan daya dari motor menuju baterai. Akibat dari pengereman regeneratif tersebut kecepatan putaran motor akan semakin berkurang. Semakin besar daya pengereman maka akan semakin besar pula penurunan kecepatan putaran motor. Pada saat $20.5 < t \leq 23$, yaitu selama 2.5 detik, konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif *buck*. Sedangkan pada saat $23 < t \leq 26$, yaitu selama 3 detik, konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif *boost*.

- Konverter Tidak Bekerja

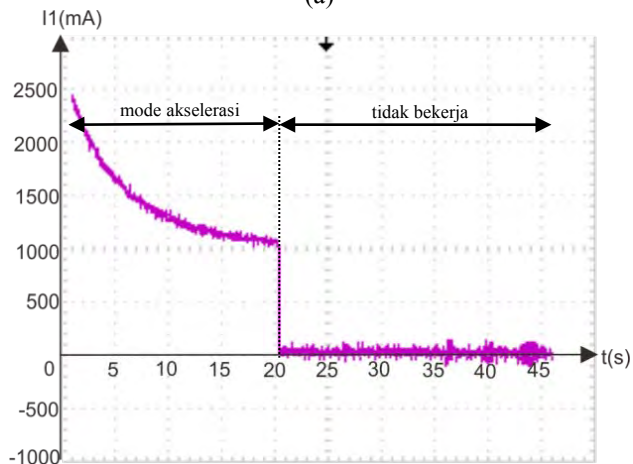
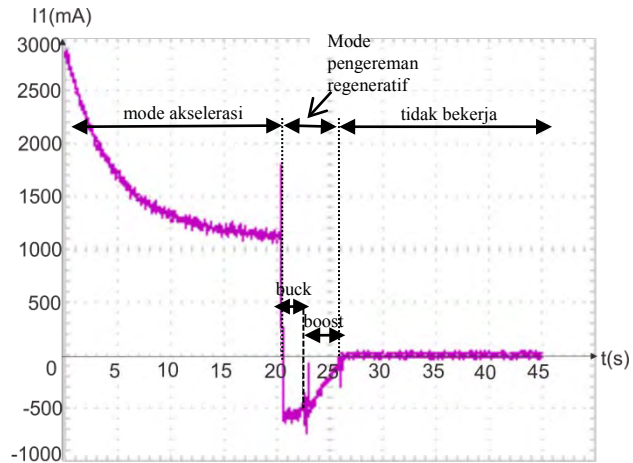
Pada kondisi ini konverter sudah tidak lagi bekerja pada mode pengereman regeneratif sehingga kecepatan putaran motor bernilai turun hanya diperlambat oleh gaya gesek saja.

Pada pengereman pengereman regeneratif, penurunan kecepatan putaran motor akan semakin besar seiring dengan semakin besar daya yang diambil dari motor. Sehingga pada saat $20.5 < t \leq 26$ penurunan kecepatan motor DC lebih besar jika dibandingkan pada saat $26 < t \leq 38$, karena pada saat pengereman regeneratif motor dibebani secara elektrik dengan mensuplai daya menuju baterai melewati konverter. Sedangkan tanpa pengereman regeneratif penurunan kecepatan putaran motor relatif kecil dikarenakan motor tidak dibebani secara elektrik dan hanya diperlambat oleh gaya gesek pada motor dan beban *flywheel*.

4.3.4 Arus Baterai

Pada saat mode akselerasi, konverter mengalirkan daya dari baterai menuju motor DC melewati konverter. Dengan demikian arus baterai pada saat akselerasi merupakan arus pengosongan (*discharging*) baterai. Sebaliknya pada saat mode pengereman regeneratif, konverter

mengalirkan daya dari motor DC menuju baterai. Arus baterai pada kondisi tersebut merupakan arus pengisian (*charging*) baterai. Grafik arus baterai pada kedua mode tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.13.



Gambar 4.13. Grafik arus baterai, (a) dengan pengereman regeneratif, (b) tanpa pengereman regeneratif

Grafik arus baterai selama pengujian dibagi menjadi 3 bagian.

- Mode Akselerasi

Pada mode akselerasi, yaitu saat $t < 20.5$, arus baterai bernilai positif, hal ini dikarenakan aliran daya mengalir dari baterai menuju beban motor DC. Arus baterai pada saat starting bernilai lebih dari 2400mA. Arus tersebut bernilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan arus saat *steady state* yaitu sebesar 1050mA.

- Mode Pengereman Regeneratif

Pada saat $20.5 < t < 26$, arus baterai bernilai positif, hal ini dikarenakan konverter bekerja pada mode pengereman regeneratif sehingga aliran daya mengalir dari motor DC menuju baterai. Arus pada kondisi ini disebut pula arus pengisian baterai. Pada pengujian ini besarnya arus pengisian baterai pada saat pengereman regeneratif dibatasi sebesar 500mA dengan tujuan agar didapatkan waktu pengereman yang cukup untuk diamati. Selain itu arus pengisian baterai perlu dibatasi untuk mengamankan baterai akibat kelebihan arus pengisian, terutama pada saat baterai kosong.

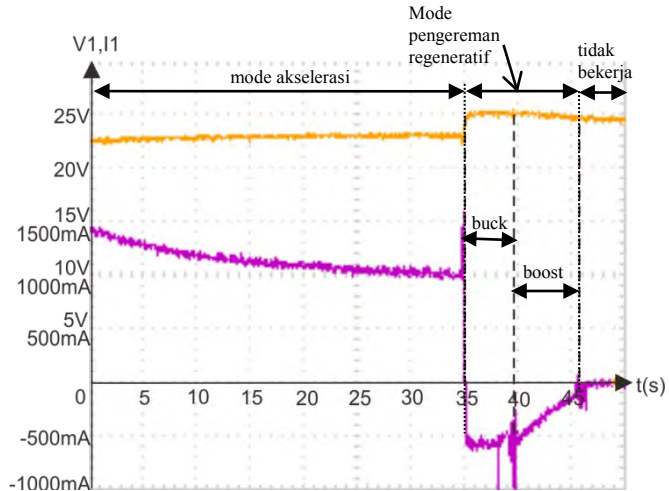
- Konverter Tidak Bekerja

Pada saat $t > 26$ detik, konverter tidak lagi bekerja pada mode pengereman regeneratif. Arus pada baterai pada kondisi ini bernilai nol, artinya pada kondisi ini tidak dilakukan pengisian terhadap baterai.

Seperti ditunjukkan pada gambar 4.13(a) dan 4.13(b), grafik arus baterai dengan pengereman regeneratif berbeda dengan grafik arus baterai tanpa pengereman regeneratif. Pada pengereman regeneratif, terdapat kondisi dimana arus baterai bernilai negatif, dengan kata lain terdapat arus pengisian baterai. Sedangkan pada grafik arus baterai tanpa pengereman regeneratif tidak terdapat arus pengisian baterai ($I_1 = 0$).

4.3.5 Tegangan, Arus dan Daya pada Sisi Baterai

Pada pengujian konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini menggunakan dua baterai 12V yang disusun secara seri sehingga didapatkan baterai dengan tegangan 24V. Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.3.4, arus baterai pada mode akselerasi bernilai positif (pengosongan) dan pada mode pengereman bernilai negatif (pengisian). Gambar 4.14 menunjukkan grafik tegangan dan arus baterai selama pengujian yaitu pada mode akselerasi dan mode pengereman regeneratif.



Gambar 4.14. Hubungan tegangan dan arus baterai

Pada mode akselerasi arus yang melewati baterai bernilai positif, dengan kata lain baterai mensuplai daya menuju motor melewati konverter. Pada kondisi ini tegangan baterai akan turun seiring dengan kenaikan arus pengkosongan baterai, dan sebaliknya tegangan baterai naik seiring dengan turunnya arus pengkosongan baterai. Pada mode akselerasi saat steady state tegangan baterai sebesar 23V dan arus baterai sebesar 1A. Besarnya daya yang dikeluarkan baterai pada mode akselerasi saat *steady state* dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$P_{\text{baterai}} = V_{\text{baterai}} \times I_{\text{baterai}} \quad (4.6)$$

$$P_{\text{pengkosongan baterai}} = 23 \times 1 = 23W \quad (4.7)$$

Pada mode pengereman regeneratif, semakin tinggi tegangan pengisian maka arus pengisian akan semakin besar pula, begitu pula sebaliknya. Seperti ditunjukkan pada gambar 4.14, pada mode pengereman regeneratif tegangan pengisian baterai lebih besar daripada tegangan *open circuit* baterai. Namun pada saat konverter sudah tidak bekerja, tegangan baterai merupakan tegangan *open circuit* yaitu sebesar 24.5V. Arus pengisian pada pengujian diatur sebesar 0.5A, sehingga daya pengisian baterai pada mode pengereman regeneratif sebesar.

$$P_{\text{baterai}} = V_{\text{baterai}} \times I_{\text{baterai}} \quad (4.8)$$

$$P_{\text{pengisian baterai}} = 25 \times 0.5 = 12.5W \quad (4.9)$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi serta analisis data hasil implementasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Konverter DC-DC *buck boost* dua arah pada pengerjaan tugas akhir ini dapat menaikkan atau menurunkan level tegangan DC pada dua arah aliran daya.
2. Konverter DC-DC *buck boost* dua arah pada tugas akhir ini dapat mengalirkan daya sebesar 200W sesuai dengan desain.
3. Pada pengujian konverter, tegangan keluaran konverter pada implementasi lebih kecil daripada perhitungan tegangan secara teori dan simulasi. Perbedaan hasil tersebut dapat dikarenakan pengaruh komponen yang tidak ideal pada implementasi konverter.
4. Pada mode pengereman regeneratif, konverter dapat memperlambat kecepatan putaran motor dengan membebani secara elektrik
5. Pada pengujian konverter mode pengereman regeneratif, konverter dapat mengisi kembali baterai dengan arus pengisian sebesar 500mA.

5.2 Saran

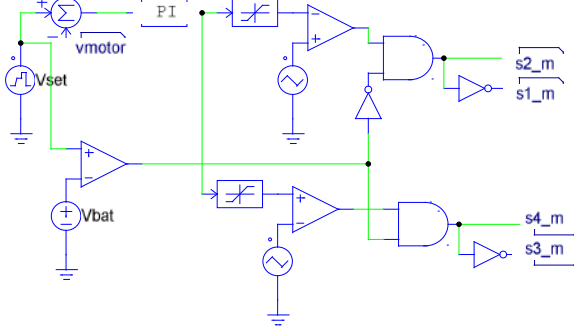
Pada implementasi konverter DC-DC *buck boost* dua arah ini menggunakan beban motor DC yang dikopel dengan *flywheel*. Besaran inersia gabungan kedua beban tersebut relatif kecil sehingga menyebabkan waktu pengereman singkat. Bagi pembaca yang selanjutnya ingin melakukan pengujian pengereman regeneratif pada motor, disarankan untuk menggunakan beban *flywheel* yang mempunyai besaran inersia lebih besar.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

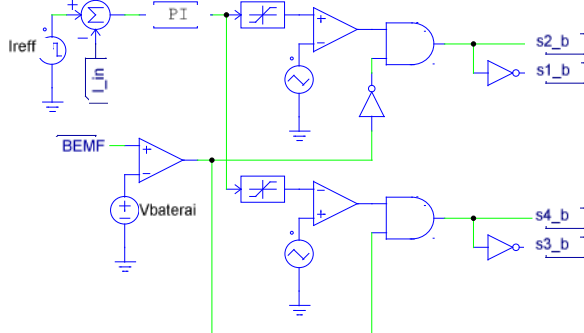
LAMPIRAN

1. Simulasi dengan *Software* PSIM.

Kontrol Mode Akselerasi:



Kontrol Mode Pengereman Regeneratif:



2. Kode pemrograman mikrokontroler.

```
/******
```

```
This program was produced by the  
CodeWizardAVR V2.05.3 Standard  
Automatic Program Generator  
© Copyright 1998-2011 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.  
http://www.hpinfotech.com
```

```
Chip type      : ATmega16A  
Program type   : Application  
AVR Core Clock frequency: 12,000000 MHz  
Memory model   : Small  
External RAM size : 0  
Data Stack size : 256
```

```
*****/
```

```
void PI_motoring()
```

```
{  
  //Proporsional  
  errorM=voltage-Vmotor;  
  outPM=Kp_m*errorM;  
  
  //Integral  
  errorIM=errorM+errorIMbefore;  
  outIM=(Ki_m*errorIM)/100;  
  errorIMbefore=errorIM;  
  
  //kontrol PI, merupakan gabungan dari kontrol P dan I  
  outPIM=outPM+outIM;  
}
```

```
void PI_braking()
```

```
{  
  //Proporsional  
  errorB=200-(arus/4); //awalnya arus=arus real dalam mA  
  outPB=errorB/Kp_b; //nilai Kp ditentukan melalui tuning  
  
  //Integral  
  errorIB=errorB+errorIBbefore;  
  outIB=(Ki_b*errorIB)/Tc_b;  
  errorIBbefore=errorIB;  
  
  //kontrol PI, merupakan gabungan dari kontrol P dan I  
  outPIB=outPB+outIB;  
}
```

```

while(1)
{
Kp_m = 5;
Ki_m = 2;
Kp_b = 0,1;
Ki_b = 1;
if (PINC.7==1)
{
Ssense=read_adc(0);
potentio=read_adc(5);
Vsense=read_adc(3); //ini adalah sensor tegangan
Vmotor=((Vsense*2)/41); //sudah dalam Voltage asli
voltage=((potentio*2)/41);
if (potentio<=492) //492=24 volt 412=20 volt
{
if (potentio<100)
{
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("OFF ");
OCR1A=511;
OCR1B=511;
}
else
{
PI_motoring(); //memanggil PI
if(outPIM<0)
{
outPIM=0;
}
if (outPIM>450)
{
outPIM=450;
}
OCR1A=511-outPIM;
OCR1B=0; //saklar S3 selalu hidup
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("M.Buck ");
}
}
}

else
{
PI_motoring(); //memanggil PI
if(outPIM<0)
{
outPIM=0;
}
if (outPIM>306)
{

```

```

        outPIM=306;
    }
    OCR1A=0;           //saklar S1 selalu hidup
    OCR1B=outPIM;
    lcd_gotoxy(0,0);
    lcd_putsf("M.Boost ");
    }
    sprintf(bufV,"V= %d ",voltage);
    lcd_gotoxy(8,0);
    lcd_puts(bufV);
    sprintf(bufVM,"Vm= %d      ",Vmotor); // duty cycle S1
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_puts(bufVM);
    }
}

if (PINC.7==0)
{
    Ssense=read_adc(0);
    arus=read_adc(1); //ini adalah sensor arus
    BEMF=(Ssense/6); //dalam RPM (Ssense*5)----dalam emf (RPM/30) saat Vf=30V
    if (BEMF>32)
    {
        PI_braking();
        sprintf(bufPI,"%d ",outPIB);
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_puts(bufPI);
        if (outPIB<=100)
        {
            outPIB=100;
        }
        if (outPIB>511)
        {
            outPIB=511;
        }
        pi=outPIB;
        OCR1B=511-pi; //Ton saklar S3
        OCR1A=0; //OCR1A=0;           //saklar S1 selalu hidup
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_putsf("B.Buck ");
    }
}
else //kurang dari tegangan baterai
{
    if (BEMF>18)
    {
        PI_braking();
        sprintf(bufPI,"%d ",outPIB);
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_puts(bufPI);
        if (outPIB2<200)
    }
}

```

```

        {
            outPIB2=200;
        }
        if (outPIB2>350)
        {
            outPIB2=350;
        }
        OCR1A=outPIB; //yang di switch adalah saklar S1
        OCR1B=0; //OCR1B=0;          //saklar S3 selalu hidup
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_putsf("B.Boost ");
    }
else
{
    OCR1B=511;
    OCR1A=511;
    lcd_gotoxy(0,0);
    lcd_putsf("END   ");
}
}
sprintf(bufBEMF,"BEMF= %d ",BEMF);
lcd_gotoxy(8,1);
lcd_puts(bufBEMF);
sprintf(bufI,"I= %d mA   ",arus);
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_puts(bufI);
}
}
}

```

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashari, Mochamad, “Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya” ITS Press, Surabaya, 2012
- [2] C.C.Chan, Y. S. Wong, A. Bouscayrol, and C.Keyu, "Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [Point of View]," Proceedings of the IEEE, vol. 97, pp. 603-607, 2009
- [3] Dong Lei, Wang Xueping, Liu Zhen, Liao Xiaozhong. “A New Soft Switching Bidirectional Buck or Boost DC-DC Converter”. Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1163 – 1167, 2013
- [4] Fitzgerald, A.E., Kingsley, Charles Jr., Umans, Stephen D. (2003). ELECTRIC MACHINERY SIXTH EDITION, New York : McGraw-Hill
- [5] Lung-Sheng Yang and Tsorng-Juu Liang, “Analysis and Implementation of a Novel Bidirectional DC–DC Converter”, IEEE Transaction on Industrial Electronic, Vol. 59, No. 1, 2012.
- [6] Mahendra Chandra J, Susovan Samanta. “Modeling and Control of Bidirectional DC-DC Converter Fed PMDC Motor for Electric Vehicles”. 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1 – 6, 2013
- [7] Rashid M.H, “Power Electronics Handbook ”, Academic Press, 2001.
- [8] International Rectifier. 2011. “IRF540N Datasheet”. www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf540n.pdf. Diakses pada jumat, 22 mei 2015 jam 19.45.
- [9] Innovative Electronics. 2013. “DT-Sense Current Sensor With OpAmp”. innovativeelectronics.com/innovative_electronics/download_files/manual/Manual_DT-Sense_Current_Sensor.pdf. Diakses pada jumat, 22 mei 2015 jam 19.55.
- [10] Atmel Corporation. 2014. “Atmega16A Datasheet”. [www.atmel.com/images/atmel-8154-8-bit-avr-atmega16a _datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8154-8-bit-avr-atmega16a_datasheet.pdf). Diakses pada jumat, 22 mei 2015 jam 20.30.
- [11] Toshiba. 2017. “TLP250 Datasheet”. www.toshiba.semicon-storage.com/. Diakses pada jumat, 22 mei 2015 jam 20.40.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Yudo Kusuma Wijaya, lahir di kabupaten Karanganyar provinsi Jawa Tengah pada tanggal 12 Oktober 1993. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri Tunggulrejo 3 kecamatan Jumentono kabupaten Karanganyar pada tahun 2005, SMP Negeri 2 Jatiyoso kabupaten Karanganyar pada tahun 2008, SMA MTA Surakarta pada tahun 2011 dan hingga buku ini ditulis penulis masih terdaftar sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis memiliki hobi membaca, traveling, bermain game dan segala sesuatu mengenai elektronika daya. Impian Penulis sejak kecil adalah menjadi orang yang hebat dan bermanfaat bagi orang lain. Segala sesuatu hal yang ingin didiskusikan dengan penulis dapat melalui email ykwijaya@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)